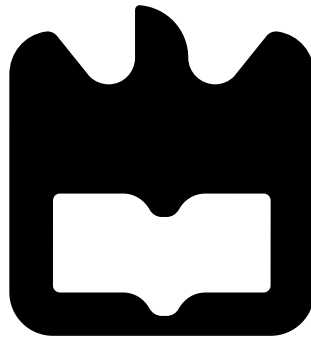




**André Alexandre
Aranha de Almeida**

**Propagação de sinais modulados em amplitude no
contexto de NG-PON2**





**André Alexandre
Aranha de Almeida**

**Propagação de sinais modulados em amplitude no
contexto de NG-PON2**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Mário José Neves de Lima, Professor Auxiliar do Departamento de Eletrónica, Telecomunicações e Informática da Universidade de Aveiro e sob Co-orientação científica de Ali Shahpari do Instituto de Telecomunicações.

o júri

presidente

Professor Doutor José Manuel Neto Vieira

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

vogais

Professor Doutor Paulo Sérgio de Brito André

Professor Associado com Agregação da Universidade de Lisboa

Professor Doutor Mário José Neves de Lima

Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (Orientador)

Agradecimentos

Gostaria de agradecer à minha família, em especial aos meus pais e irmã por me ajudarem, apoiarem e suportarem em toda a minha vida, em particular no meu percurso académico. Sem eles nada disto teria sido possível.

Um grande agradecimento ao meu orientador Doutor Mário Lima e co-orientador Dr. Ali Shahpari pelo apoio, partilha de informação e ajuda prestada durante todo este tempo.

A todos os meus colegas ao longo desta caminhada no curso, pelo apoio, ajuda, espírito de amizade, horas de estudo e muitos bons momentos. Em especial ao João Andrade pelo grande apoio e amizade ao longo deste trajeto.

Agradeço também aos meus colegas da sala de ótica, André Barros, Sérgio Dias, Carla Rodrigues e Tiago Morgado pelos dias de trabalho, pela ajuda prestada e pela companhia nos bons e maus momentos.

Por fim, um especial agradecimento à Joana Gomes, por todos os momentos que passamos, pela força transmitida e por me acompanhares sempre neste trajeto que ainda está a começar para nós.

Um muito obrigado a todos!

Palavras-chave

Redes Óticas Passiva, NG-PON2, TWDM-PON, Transmissores diretamente modulados, Recetores óticos.

Resumo

O crescimento contínuo de serviços como VoIP, *streams* de vídeo e comunicações ponto-a-ponto levou a um aumento da largura de banda para comunicações a alta velocidade. Pelo que as redes PON, *Passive Optical Network*, têm sido instaladas, de modo a darem resposta ao incessante aumento de ritmos de transmissão e largura de banda. Assim, as tecnologias GPON (*Gigabit Passive Optical Network*) e 10GPON (*10 Gigabit Passive Optical Network*) necessitaram de ser melhoradas, criando assim o NG-PON2 (*Next Generation Passive Optical Network 2*), tendo esta a capacidade de coexistência com tecnologias anteriores e melhoria no ritmo de transmissão, largura de banda e no custo associado.

Assim, a dissertação foca-se no estudo da tecnologia NG-PON2, bem como dos transmissores diretamente modulados a ela associados, sendo analisados vários DMLs, (*Direct Modulated LASER*) de modo a perceber as suas diferentes características, vantagens e limitações para cenários de transmissão com e sem fibra ótica. Para tal, utilizou-se valores de *Extinction Ratio* (ER) diferentes para analisar a qualidade de transmissão dos diferentes LASERs.

Com esta dissertação foi possível concluir que os transmissores diretamente modulados, podem ser uma boa solução para a tecnologia estudada, contudo existem certos parâmetros, tais como o ER e os valores das correntes de polarização e modulação utilizados, que devem ser analisados e escolhidos cuidadosamente de modo a melhorar a qualidade da transmissão.

Keywords

Passive Optical Network, NG-PON2, TWDM-PON, Direct Modulated Laser, Optical receivers.

Abstract

The continued growth services such as VoIP, video streams, and point-to-point communications has led to an increase in bandwidth for high-speed communications. At that PON has been installed in order to cope with the continual increase in transmission speeds and bandwidth. Thus, GPON and 10GPON technologies required being improved, thereby creating NG-PON2 that has, the coexistence capability with earlier technologies and improvement in speed, bandwidth, and the associated cost.

Thus, the dissertation focuses on the study of NG-PON2 technology as well as the transmitters associated with it and addressed several DMLs to understand their different characteristics, advantages, and limitations for broadcast scenarios with and without optical fiber . For this, several values of ER was used in order to analyse the transmission quality for different LASERS.

This dissertation allowed concluding that the transmitters directly modulated, can be a good solution for the studied technology, but there are certain parameters, like ER and the polarization and modulation currents used, that must be analyzed and carefully chosen so as to improve the transmission quality.

Índice

Índice	i
Índice de Figuras	iii
Índice de Tabelas	v
Lista de Acrónimos	vii
1 Introdução	1
1.1 Contexto e motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da dissertação	2
1.4 Contribuições	3
2 Redes óticas de acesso passivas	5
2.1 Arquitetura geral de uma rede ótica passiva	5
2.2 Tecnologias precedentes	6
2.2.1 Ethernet PON	6
2.2.2 Gigabit PON	6
2.2.3 10 Gigabit PON	7
2.3 NG-PON2	8
2.3.1 Introdução e motivação à criação da tecnologia	8
2.3.2 Características e Arquitetura	8
2.4 Transcetores no contexto NG-PON2	12
2.4.1 Interfaces conectáveis de alta velocidade de entrada/saída	12
2.4.2 SFP e SFP+ (<i>Small form-factor pluggable</i>)	14
2.4.3 XFP (<i>10 Gigabit Small form-factor pluggable</i>)	14
2.4.4 <i>Transmitter Optical Sub-Assemblies</i>	14
2.4.5 <i>Receiver Optical Sub-Assemblies</i>	15
2.4.6 <i>Bidirectional Optical Sub-Assemblies</i>	16
2.5 Componentes óticos	16
2.5.1 Transmissores modulados diretamente	17
2.5.1.1 Largura espectral associada ao laser	18
2.5.1.2 Curva característica potência em função da corrente de polarização do LASER	18
2.5.1.3 Ruído RIN	19
2.5.1.4 <i>Chirp</i>	19

2.5.1.5	<i>Chirp Managed Laser</i>	20
2.5.2	Recetores óticos	20
2.5.3	Ruído em recetores óticos	21
2.5.4	Fotodetetor PIN	21
2.5.5	Fotodetetor de Avalanche	21
2.5.6	Eficiência Quântica	22
2.5.7	Responsividade	22
2.5.8	Largura de banda	23
2.5.9	Fibra Ótica	23
2.5.9.1	Atenuação	23
2.5.9.2	Dispersão cromática	24
2.6	Conclusões	25
3	Resultados de simulação	27
3.1	TWDM-PON 10 Gb/s NRZ	27
3.2	Conclusões	33
4	Resultados experimentais	35
4.1	TOSA modulado diretamente 10 Gb/s NRZ	35
4.1.1	Análise do sistema para <i>Extinction Ratio</i> de 4 dB	38
4.1.2	Análise do sistema para <i>Extinction Ratio</i> de 6 dB	40
4.1.3	Conclusões TOSA Laser modulado diretamente 10 Gb/s NRZ	42
4.2	BOSA Laser modulado diretamente 10 Gb/s NRZ	43
4.2.1	Análise para ER de 4 dB	44
4.2.2	Análise para ER de 5 dB	47
4.2.3	Análise para ER de 5.5 dB	50
4.2.4	Conclusões BOSA LASER modulado diretamente 10 Gb/s NRZ	53
4.3	<i>Chirp Reduced Laser</i> 10 Gb/s NRZ	54
4.3.1	Conclusões CRL	59
4.4	Comparação entre LASERs	59
5	Conclusões e trabalho futuro	61
5.1	Conclusões	61
5.2	Trabalho futuro	62
	Bibliografia	63

Índice de Figuras

1.1	Aumento da largura de banda ao longo dos anos.	1
2.1	Arquitetura de uma rede ótica passiva	6
2.2	Planeamento de comprimentos de onda da tecnologia EPON.	6
2.3	Planeamento de comprimentos de onda da tecnologia GPON.	7
2.4	Planeamento de comprimentos de onda da tecnologia 10 GPON.	7
2.5	Planeamento de comprimentos de onda das tecnologias atuais, <i>downstream</i> e <i>upstream</i>	9
2.6	Diagrama da arquitetura TWDM-PON.	10
2.7	Portas típicas para interfaces conectáveis.	13
2.8	Estrutura de um TOSA.	15
2.9	Estrutura de um ROSA.	16
2.10	Estrutura interna de um BOSA.	16
2.11	Modulação direta(cima) e modulação externa(baixo).	17
2.12	Conceito de modulação direta de um laser semiconductor.	18
2.13	Variação da potência ótica de saída do LASER com a corrente de polarização.	19
2.14	Princípio de operação de um CML.	20
2.15	Dependência da resposividade com o comprimento de onda.	22
2.16	Relação entre a atenuação e comprimento de onda na fibra.	24
2.17	Dispersão cromática em função do comprimento de onda.	25
3.1	Esquemático para caracterização <i>Upstream</i> com 20 km fibra.	28
3.2	Variação do ER com o índice de modulação	29
3.3	Análise da sensibilidade do sistema com a variação do índice de modulação com e sem fibra ótica.	30
3.4	Análise da sensibilidade do sistema com a variação do índice de modulação com e sem fibra ótica utilizando parâmetros de <i>chirp</i>	32
4.1	<i>Setup</i> experimental.	36
4.2	Interface gráfica da placa de teste MAX3949.	36
4.3	Curva característica potência de saída em função da corrente de polarização para LASER DML.	37
4.4	Caracterização do LASER com a variação da temperatura.	38
4.5	Diagrama de olho à saída do LASER.	39
4.6	Análise entre a potência ótica recebida e o BER para ER de 4 dB.	40
4.7	Diagrama de olho à saída do LASER.	41
4.8	Análise entre a potência ótica recebida e o BER para ER de 6 dB.	41

4.9	Potência de saída do LASER em função da corrente de polarização.	44
4.10	Diagrama de olho à saída do LASER.	45
4.11	Espectro ótico do LASER para o ER de 4 dB respectivo ao comprimento de onda de 1532.64 nm.	45
4.12	Análise entre a potência ótica recebida e o BER para ER de 4 dB.	46
4.13	Diagrama de olho de saída para um BER de 1e-9 em <i>back-to-back</i> (esquerda) e com 20 km de fibra (direita).	47
4.14	Diagrama de olho à saída do LASER.	48
4.15	Espectro ótico do LASER para o ER de 5 dB respectivo ao comprimento de onda de 1532.69 nm.	48
4.16	Análise entre a potência ótica recebida e o BER para ER de 5 dB.	49
4.17	Diagrama de olho de saída para um BER de 1e-9 em <i>back-to-back</i> (esquerda) e com 20 km de fibra (direita).	50
4.18	Diagrama de olho à saída do LASER.	51
4.19	Espectro ótico do LASER para o ER de 5.5 dB respectivo ao comprimento de onda de 1532.68 nm.	51
4.20	Análise entre a potência ótica recebida e o BER para ER de 5.5 dB.	52
4.21	Diagrama de olho de saída para um BER de 1e-9 em <i>back-to-back</i> (esquerda) e com 20 km de fibra (direita).	53
4.22	Potência de saída do LASER em função da corrente de polarização.	55
4.23	Diagrama de olho à saída do LASER.	56
4.24	Espectro ótico do LASER para o ER de 8.06 dB respectivo ao comprimento de onda de 1597.95 nm.	56
4.25	Análise entre a potência ótica recebida e o BER para ER de 8.06 dB.	57
4.26	Diagrama de olho à saída do LASER.	58
4.27	Análise entre a potência ótica recebida e o BER para ER de 8.2 dB.	58

Índice de Tabelas

2.1	Parâmetros mais relevantes para transmissão <i>downstream</i> com ritmo de transmissão de 2.5 Gb/s.	10
2.2	Parâmetros mais relevantes para transmissão <i>downstream</i> com ritmo de transmissão de 10 Gb/s.	11
2.3	Parâmetros mais relevantes para transmissão <i>upstream</i> com ritmos de transmissão de 2.5 Gb/s.	11
2.4	Parâmetros mais relevantes para transmissão <i>upstream</i> com ritmos de transmissão de 10 Gb/s.	12
2.5	Classes dos diferentes ODN.	12
2.6	Tabela com dispositivos SFP+ e XFP para a tecnologia NG-PON2	14
3.1	Tabela com os comprimentos de onda da tecnologia TWDM-PON.	27
3.2	Parâmetros relevantes do sistema	28
3.3	Potência ótica recebida em <i>back-to-back</i> e respetiva penalidade de potência .	30
3.4	Penalidade de potência entre curvas em <i>back-to-back</i> e com 20km de fibra ótica	31
3.5	Parâmetros de <i>chirp</i> utilizados na simulação	31
3.6	Potência ótica recebida em <i>back-to-back</i> e respetiva penalidade de potência .	32
3.7	Penalidade de potência entre curvas em <i>back-to-back</i> e com 20km de fibra ótica	33
4.1	Tabela com os dados mais relevantes relativos aos quatro comprimentos de onda	39
4.2	Tabela com os dados mais relevantes relativos aos quatro comprimentos de onda	40
4.3	Tabela com valores obtidos para um ER de 4 dB	42
4.4	Tabela com valores obtidos para um ER de 6 dB	42
4.5	Tabela com os dados mais relevantes relativos aos quatro comprimentos de onda	44
4.6	Tabela com diferenças entre os dois maiores picos dos espectros	46
4.7	Tabela com os resultados mais relevantes relativos aos quatro comprimentos de onda	47
4.8	Tabela com diferenças entre os dois maiores picos dos espectros	49
4.9	Tabela com os resultados mais relevantes relativos aos quatro comprimentos de onda	50
4.10	Tabela com diferenças entre os dois maiores picos dos espectros	52
4.11	Tabela com os valores obtidos para um ER de 4 dB	53
4.12	Tabela com os valores obtidos para um ER de 5 dB	53
4.13	Tabela com os valores obtidos para um ER de 5.5 dB	54
4.14	Tabela com os valores obtidos para a caracterização do CRL	55
4.15	Tabela com os valores obtidos para a caracterização do CRL	57

4.16 Tabela com valores obtidos para CRL	59
--	----

Lista de Acrónimos

10GPON	<i>10 Gigabit Passive Optical Network</i>
APD	<i>Avalanche Photodiode</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BOSA	<i>Bidirectional Optical Sub-assemblies</i>
CML	<i>Chirp Managed Laser</i>
CRL	<i>Chirp Reduced Laser</i>
DFB	<i>Distributed feedback laser</i>
DML	<i>Direct Modulated Laser</i>
EPON	<i>Ethernet Passive Optical Network</i>
FSAN	<i>Full Service Access Network</i>
FTTH	<i>Fiber to the home</i>
GPON	<i>Gigabit Passive Optical Network</i>
HDTV	<i>High-definition television</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ITU-T	<i>International Telecommunication Union-Telecommunication</i>
LASER	<i>Light amplification by stimulated emission of radiation</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
NG-PON	<i>Next Generation Passive Optical Network</i>
NG-PON2	<i>Next Generation Passive Optical Network 2</i>
NRZ	<i>Non-return-to-zero</i>
ODN	<i>Optical Distribution Network</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OLT	<i>Optical Line Terminal</i>
ONT	<i>Optical Network Terminal</i>
ONU	<i>Optical Network Unit</i>
OSA	<i>Optical Spectrum Analyzer</i>
OSR	<i>Optical Spectrum Reshaper</i>

PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PIN	<i>Positive-Intrinsic-Negative</i>
PON	<i>Passive Optical Network</i>
PtP	<i>Peer to Peer</i>
RIN	<i>Relative Intensity Noise</i>
ROSA	<i>Receiver Optical Sub-assemblies</i>
SFP	<i>Small Form-factor Pluggable</i>
TEC	<i>Thermoelectric Cooling</i>
TIA	<i>Transimpedance Amplifier</i>
TOSA	<i>Transmitter Optical Sub-assemblies</i>
TWDM	<i>Time and Wavelength Division Multiplexing</i>
UDWDM	<i>Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i>
WDM	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
XFP	<i>10 Gigabit Small Form Factor Pluggable</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contexto e motivação

Com a evolução da tecnologia, o aumento das taxas de dados aumentaram bastante, inviabilizando o transporte de informação através de cabos coaxiais, pela sua grande atenuação e baixa capacidade de transporte. Assim, a fibra ótica ganhou relevância, pela sua grande capacidade de transporte e baixa atenuação, permitindo fazer ligações a grandes distâncias e com grandes velocidades.

Com a introdução da fibra ótica, tornou-se possível fornecer serviços a mais clientes com menos equipamento e velocidades de dados superiores, de modo a satisfazer as necessidades dos utilizadores e ter um sistema mais fiável. Sendo um sistema vantajoso tanto do ponto de vista do cliente como das empresas prestadoras de serviços.

Apesar de existirem redes ótica capazes de suportar as necessidades atuais, estas não terão capacidade para acompanhar a evolução da tecnologia, sendo necessário criar outras soluções. Assim, o objetivo passa por aumentar as taxas de dados, diminuindo os custos de investimento e de operação. [1]

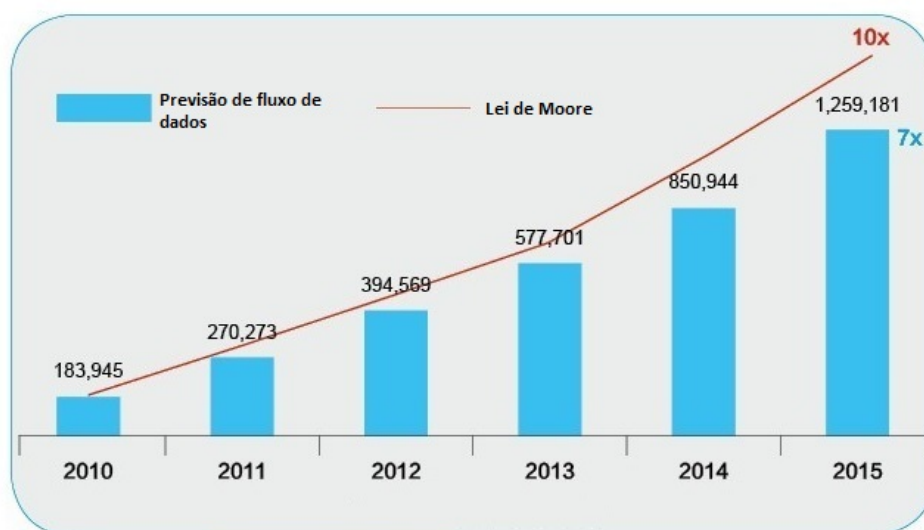


Figura 1.1: Aumento da largura de banda ao longo dos anos. [2]

Como se pode ver pela figura 1.1, o aumento da largura de banda tem sido uma constante ao longo dos anos, assim a tecnologia TWDM-PON, (*Time and Wavelength Division Multiplexing*), tem o intuito de dar resposta ao rápido crescimento de tecnologias como a Internet das coisas, *clouds* e outros serviços que consomem uma grande quantidade de largura de banda.

Deste modo, têm-se desenvolvido estudos exaustivos das novas tecnologias óticas, conhecidas como NG-PON, *Next Generation Passive Optical Network*, que têm o objetivo de suprimir os problemas existentes nas redes atuais, oferecendo maior largura de banda, maior alcance, coexistência entre tecnologias e um maior número de clientes. Para tal, têm-se desenvolvido dispositivos capazes de aumentar e melhorar a velocidade e qualidade da transmissão, conhecidos como BOSA (*Bidirectional Optical Sub-assemblies*), estes são dispositivos óticos de pequenas dimensões, sendo integrados em interfaces conectáveis, capazes de efetuar transmissões bidirecionais a grandes velocidades.

Assim, esta dissertação foca-se no estudo e análise da tecnologia NG-PON2 e nos componentes que a constituem, dando ênfase aos transmissores modulados diretamente em amplitude, com o objetivo de perceber as suas vantagens e desvantagens bem como as suas limitações.

1.2 Objetivos

O principal objetivo da dissertação prende-se no estudo e análise da tecnologia NG-PON2, em particular:

- Estudo dos conceitos sobre comunicações óticas, em especial a norma da tecnologia NG-PON2;
- Análise, por simulação, que o *extinction ratio* têm no desempenho do sistema;
- Análise, por simulação, que o fenómeno de *chirp* têm no desempenho do sistema;
- Caracterização experimental de diferentes transmissores diretamente modulados;
- Análise experimental, que o ER tem no desempenho do sistema para diferentes transmissores diretamente modulados.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está organizada em 5 capítulos:

- 1- Introdução
- 2- Redes óticas de acesso passivas
- 3- Simulação
- 4- Resultados experimentais
- 5- Conclusões

Neste primeiro capítulo é feita uma introdução ao tema da dissertação, assim como, são delineados os principais objetivos, estrutura e contribuições da mesma.

No segundo capítulo é feita uma breve introdução às redes óticas passivas e explicadas as principais características dos elementos fundamentais de uma rede PON, (*Passive Optical Network*). É também abordada a tecnologia NG-PON2, desde a motivação à criação da tecnologia até as suas características e arquitetura subjacente. Em seguida, são analisados

os transmissores e recetores óticos em formato compacto e simples. Por fim, são estudados vários componentes óticos existentes na tecnologia em estudo.

No terceiro capítulo são apresentadas simulações efetuadas através do VPI com o objetivo de caracterizar a tecnologia em estudo através da variação do ER e do parâmetro de *chirp*.

No quarto capítulo são efetuadas várias caracterizações experimentais de diversos transmissores óticos modulados diretamente, analisando o impacto que a introdução da fibra ótica tem no desempenho do sistema.

Por fim, no quinto capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho efetuado e as sugestões de trabalho futuro.

1.4 Contribuições

As principais contribuições deste trabalho são:

- Estudo da tecnologia NG-PON2 e as suas principais características;
- Análise por simulação do desempenho da tecnologia em estudo;
- Análise por simulação do impacto do *extinction ratio* e do fenómeno de *chirp* no desempenho da tecnologia em estudo;
- Caracterização e teste de vários transmissores óticos para implementar na tecnologia em estudo;
- André Almeida, Mário Lima " *Experimental analysis of 10 Gb/s LASER with amplitude modulation in NG-PON2 context*" em *XIII Symposium on Enabling Optical Networks and Sensors*, Covilhã, Portugal.

Capítulo 2

Redes óticas de acesso passivas

Neste capítulo começa-se por apresentar a arquitetura geral das redes óticas passivas, em seguida são apresentadas algumas normas das redes de acesso, entre elas, EPON (*Ethernet Passive Optical Network*), GPON (*Gigabit Passive Optical Network*) e 10GPON (*10 Gigabit Passive Optical Network*) introduzindo as mesmas e explicando as suas principais características. Seguidamente analisa-se a norma NG-PON2 explicando em que consiste, as suas características e a arquitetura adjacente. Depois, analisam-se os transceptores no contexto da tecnologia em estudo e por fim, são apresentados e analisados os componentes óticos mais importantes de uma rede ótica.

2.1 Arquitetura geral de uma rede ótica passiva

Uma rede ótica passiva, como mostra a figura 2.1, é uma rede com arquitetura ponto-multi-ponto, que consiste em três elementos fundamentais, sendo eles: uma OLT (*Optical Line Terminal*), uma ODN (*Optical Distribution Network*) e vários ONUs (*Optical Network Units*). Sendo que cada um deles tem um grupo de funções particulares:

A ONU ou a ONT (*Optical Network Terminal*) são o mesmo dispositivos, contudo tem nomes diferentes consoante a sua localização na rede ótica. Sendo que o primeiro está localizado fora do edifício da empresa que fornece o serviço, enquanto o segundo está localizado na casa do cliente. Este aparelho é responsável por receber o sinal ótico proveniente da OLT e selecionar a informação que lhe corresponde.

A OLT envia o sinal em *broadcast* para todas as ONUs sendo responsável por controlar e sincronizar toda a troca de informação na rede.

O *splitter*, ou ODN, está localizado entre a OLT e cada uma das fibras que leva às ONUs, tendo a principal função de dividir ou agrupar a informação consoante a direção na qual circula. Considerando a direção *downstream* o *splitter* ótico divide a informação proveniente da central para cada um das ligações individuais das ONUs. Na direção *upstream* este componente passivo funciona como acoplador, reunindo toda a informação proveniente de cada ONU. [3]

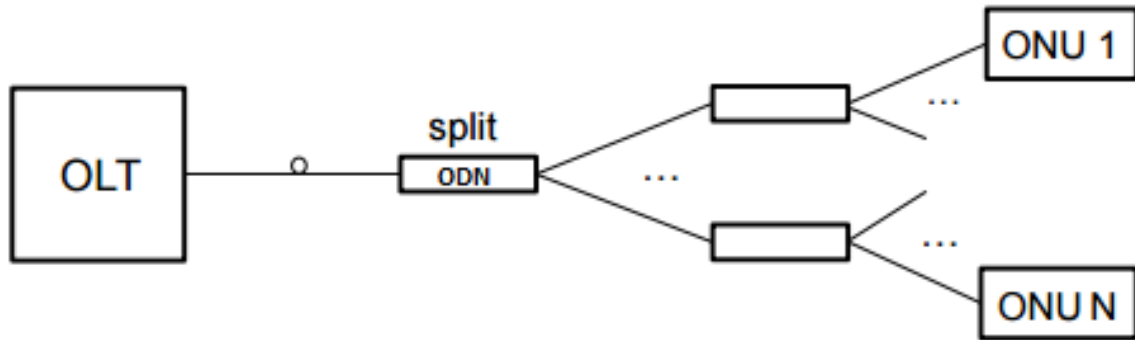


Figura 2.1: Arquitetura de uma rede ótica passiva. [4]

2.2 Tecnologias precedentes

Nesta secção, apresentam-se várias tecnologias precedentes ao TWDM-PON, entre elas EPON, GPON e 10GPON apresentando as principais características das mesmas.

2.2.1 Ethernet PON

A tecnologia EPON, criada em 2000 pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), teve como objetivo estender a *Ethernet* para as áreas de acesso. Sendo esta baseada em transporte por *Ethernet* e no transporte de informação por pacotes de diferentes tamanhos, tornando mais eficiente do que tecnologias precedentes.

A arquitetura EPON é baseada nas arquiteturas PON sendo composta por fibra monomodo e *splitters* para distribuir o tráfego. Esta é caracterizada pelo seu ritmo de transmissão de 1.25 Gb/s na direção *upstream* e *downstream*, por ter uma capacidade de *splitting* de 1:16, um alcance de 10 km, por usar WDM de modo a multiplexar vários portadores óticos numa única fibra e um planeamento de comprimento de onda que se situa entre os 1260 e 1360 nm para *upstream* e os 1480 a 1500 nm para *downstream*, como pode ser visto pela figura 2.2: [5]

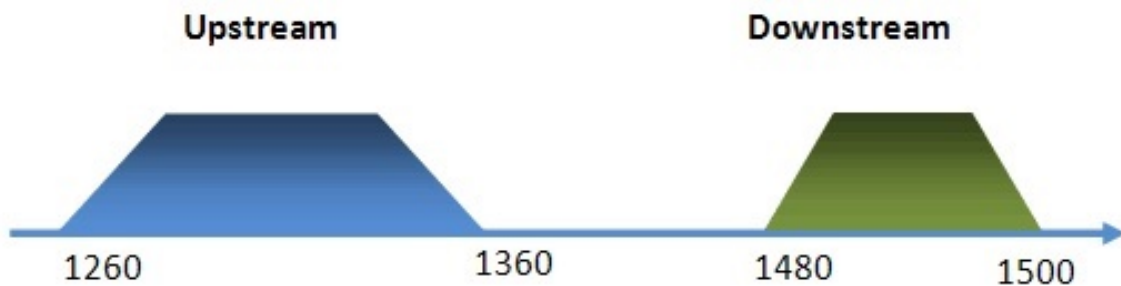


Figura 2.2: Planeamento de comprimentos de onda da tecnologia EPON. [6]

2.2.2 Gigabit PON

A tecnologia GPON, criada em 2001 pela FSAN (*Full Service Access Network*), teve como objetivo aumentar a largura de banda nas redes de acesso e aumentar as taxas de transmissão.

Sendo esta baseada em transporte por *Ethernet*, contudo de forma mais eficiente.

A arquitetura define-se pelo seu ritmo de transmissão que pode ser dividido em dois casos: 1.25 Gb/s para *upstream* e 2.5 Gb/s para *downstream* ou de 2.5 Gb/s para ambos os sentidos de transmissão. Tem um alcance de *splitting* de 1:64, um alcance de 10km e um planeamento de comprimentos de onda que se situa entre os 1290 a 1330 nm para *upstream* e os 1480 a 1500 nm para *downstream*, como pode ser visto pela figura 2.3: [5]

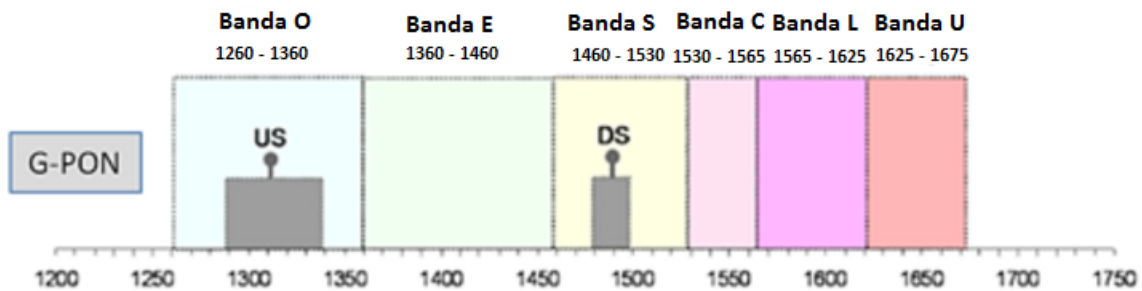


Figura 2.3: Planeamento de comprimentos de onda da tecnologia GPON. [7]

2.2.3 10 Gigabit PON

Em seguida, em 2010, o grupo FSAN criou o 10GPON, mais uma vez para satisfazer as necessidades dos utilizadores e do crescente mercado.

Esta tecnologia caracteriza-se pelo fato de coexistência com as tecnologias anteriores, pelo seu ritmo de transmissão que pode ser dividido em dois casos: 2.5 Gb/s para *upstream* e 10 Gb/s para *downstream* ou de 10 Gb/s para ambos os sentidos de transmissão. Tem uma capacidade de *splitting* de entre 1:32 e 1:256, um alcance de entre 20 km a 60 km dependendo do ritmo de transmissão e do número de utilizadores e um planeamento de comprimentos de onda que se situa entre os 1260 a 1280 nm para *upstream* e os 1575 a 1580 nm para *downstream*, como pode ser visto pela figura 2.4: [5]

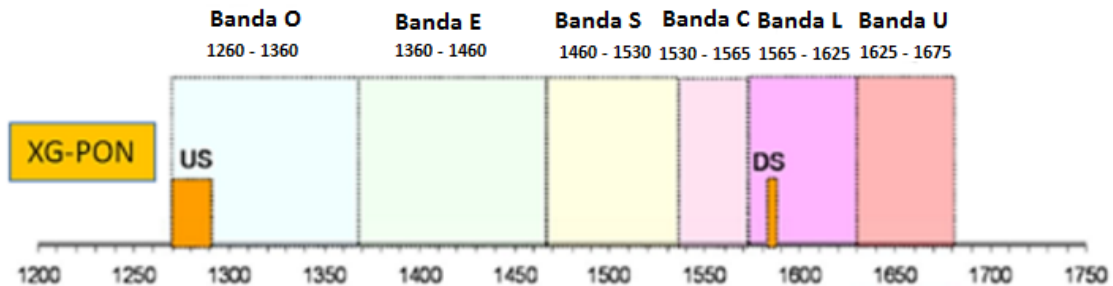


Figura 2.4: Planeamento de comprimentos de onda da tecnologia 10 GPON. [7]

2.3 NG-PON2

2.3.1 Introdução e motivação à criação da tecnologia

Nos últimos anos o desenvolvimento e implementação de tecnologias baseadas em fibra ótica tem aumentado exponencialmente, mais especificamente na prestação de serviços para o cliente final FTTH, (*Fiber to the Home*). Este crescimento está bastante relacionado com o fato dos operadores prestarem cada vez mais serviços que consomem grandes larguras de banda, tais como, HDTV (*High-definition television*), jogos *online*, televisão a três dimensões, entre outros, levando assim, a uma procura de melhores soluções do que a presente tecnologia implementada GPON e 10GPON.

Assim, um dos maiores entraves relativamente à migração para a NG-PON2, reside no fato de as ODN representarem cerca de 70% do investimento de uma PON. Sendo que um dos fatores mais importante desta tecnologia relaciona-se com a coexistência com tecnologias anteriores e a possibilidade de reutilizar os equipamentos das mesmas. Tornando-se assim uma tecnologia benéfica não só para o cliente final como também para as empresas prestadoras dos serviços. [8]

2.3.2 Características e Arquitetura

De modo a estandardizar esta tecnologia a ITU-T, (*International Telecommunication Union- Telecommunication*), publicou uma versão de várias recomendações, relativas ao NG-PON2. Deste modo, esta tecnologia deve oferecer maior capacidade por cliente que as tecnologias anteriores, sendo capaz de suportar 40 Gb/s para as direções *downstream* e *upstream*. Relativamente ao plano para o comprimento de onda do NG-PON2 foi tido em conta o melhor compromisso de coexistência com as tecnologias anteriores. Como se pode ver na figura 2.5 a banda de comprimentos de onda de *upstream* está localizada na banda C (1530-1565 nm) onde a atenuação é a mais baixa de toda a gama e onde já existe componentes desenvolvidos e compatíveis de forma a diminuir o custo das ONUs. Relativamente à banda de comprimentos de onda *downstream*, está localizada na banda L (1565-1625 nm) onde a atenuação também é baixa. [9]

Outra das características relacionadas com o NG-PON2 é a sua flexibilidade espectral, isto é, quando um dado espectro ótico não está a ser usado pelo TWDM, este pode ser usado para sistemas PtP WDM, (*Peer-to-Peer Wavelength Division Multiplexing*), facilitando o suporte de diferentes tipos de clientes na mesma ODN.

Relativamente à coexistência com tecnologias precedentes, o NG-PON2 permite que cada sistema opere de modo independente numa fibra comum, permitindo a coexistência com todo o tipo de tecnologias PON.

O sistema NG-PON2 deve ser capaz de suportar incrementos de capacidade, conhecidos como "*pay-as-you-grow*", permitindo que canais de comprimentos de onda possam ser adicionados ao sistema e possibilitando fornecer novos serviços ao sistema. Assim, um dos novos componentes introduzidos no NG-PON2 são os recetores e transmissores sintonizáveis adicionados nas ONUs, tendo como função seleccionar os canais de transmissão e receção. [9]

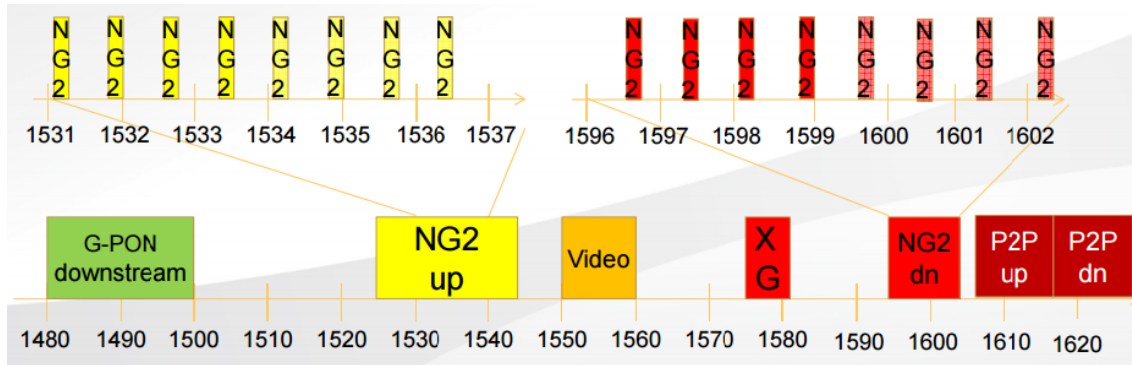


Figura 2.5: Planeamento de comprimentos de onda das tecnologias atuais, *downstream* e *upstream*. [9]

De modo a cumprir os requisitos impostos pela ITU-T, foram consideradas várias opções pela FSAN, para o NG-PON2, tais como WDM-PON, UDWDM-PON, (*Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing*), OFDM-PON, (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), TWDM-PON. Sendo que a melhor solução considerada pela FSAN foi a tecnologia TWDM-PON, uma vez que do ponto de vista do operador é considerada a de menor risco, menos disruptiva e mais barata, contribuindo assim para a standardização do NG-PON2. [10]

Esta tecnologia caracteriza-se pelo seu ritmo de transmissão, sendo capaz de transmitir informação a 40 Gb/s, para isso são "empilhados" quatro comprimentos de onda 10GPON, resultando na capacidade de agregação desejada. Tem ainda um alcance de pelo menos 40 km sem a utilização de extensão de alcance, sendo também capaz de alcançar 60 km com a utilização de extensão de alcance, é capaz de com apenas uma OLT alcançar 64 ONUs (*"splitting"*) e é ainda feita a reutilização das ODNs das tecnologias existentes. Por fim, foram ainda adicionados amplificadores óticos no lado da OLT de modo a amplificar os dados enviados em *downstream* e pré-amplificar os dados em *upstream*. [10]

Na figura 2.6 é apresentado o diagrama da arquitetura TWDM-PON:

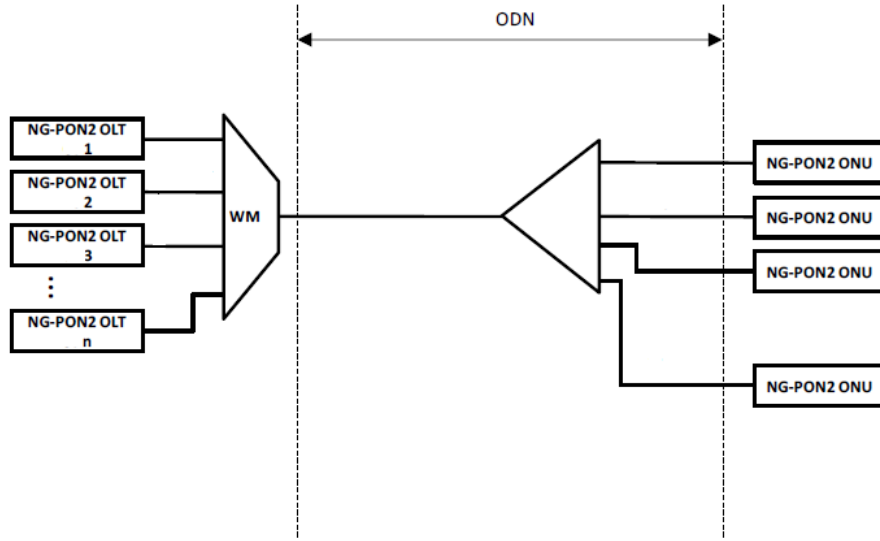


Figura 2.6: Diagrama da arquitetura TWDM-PON. [11]

Para a tecnologia NG-PON2 foram definidos duas taxas de transmissão de 2.5 Gb/s e 10 Gb/s. Em seguida, são apresentados alguns dos parâmetros mais importantes relativos a transmissão de informação pela OLT (direção *Downstream*) para os dois ritmos de transmissão de 2.5 Gb/s e 10 Gb/s nas tabelas 2.1 e 2.2, respectivamente.

Tabela 2.1: Parâmetros mais relevantes para transmissão *downstream* com ritmo de transmissão de 2.5 Gb/s. [12]

	Unidades		Valor	
Velocidade de transmissão	Gb/s		2.48832	
Codificação			NRZ	
Comprimento de onda operacional	nm		1596-1603	
Espaçamento entre canais	GHz		100	
<i>Extinction ratio mínimo</i>	dB		8.2	
Classe da ODN	N1	N2	E1	E2
Potência mínima de lançamento (dBm)	0	2	4	6
Potência máxima de lançamento (dBm)	4	6	8	10

Tabela 2.2: Parâmetros mais relevantes para transmissão *downstream* com ritmo de transmissão de 10 Gb/s. [12]

	Unidades		Valor	
Velocidade de transmissão	Gb/s		9.95328	
Codificação			NRZ	
Comprimento de onda operacional	nm		1596-1603	
Espaçamento entre canais	GHz		100	
<i>Extinction ratio minimo</i>	dB		8.2	
Classe da ODN	N1	N2	E1	E2
Potência mínima de lançamento (dBm)	3	5	7	9
Potência máxima de lançamento (dBm)	7	9	11	11

Relativamente ao espaçamento entre canais, o mesmo pode estar compreendido entre 50 GHz e 200 GHz, contudo o espaçamento de 100 GHz é o mais comum nos sistemas óticos atuais, uma vez que os 50 GHz levantam problemas de *crosstalk* entre comprimentos de onda vizinhos e o espaçamento de 200 GHz torna-se excessivo, aumentando a gama de comprimentos de onda utilizados pela tecnologia.

Em seguida, são apresentados os valores mais importantes relativos a ONU (direção *Upstream*) para os mesmos ritmos de transmissão, 2.5 Gb/s e 10 Gb/s, sumariado nas tabelas 2.3 e 2.4 respetivamente.

Tabela 2.3: Parâmetros mais relevantes para transmissão *upstream* com ritmos de transmissão de 2.5 Gb/s. [12]

	Unidades		Valor	
Velocidade de transmissão	Gb/s		2.48832	
BER referência			1e-4	
Classe da ODN	N1	N2	E1	E2
Sensibilidade tipo A (dBm)	-26	-28	-30.5	-32.5
Sensibilidade tipo B (dBm)	-30	-32	-34.5	-36.5

Tabela 2.4: Parâmetros mais relevantes para transmissão *upstream* com ritmos de transmissão de 10 Gb/s. [12]

	Unidades		Valor	
Velocidade de transmissão	Gb/s		9.95328	
BER referência			1e-3	
Classe da ODN	N1	N2	E1	E2
Sensibilidade tipo A (dBm)	-26.5	-28.5	-31	NA
Sensibilidade tipo B (dBm)	-28.5	-30.5	-33.0	-33.0

Relativamente ao tipo de sensibilidade do recetor, o tipo A refere-se a um valor de potência sem amplificação no recetor enquanto que o tipo B refere-se a um valor de potência com amplificação no recetor.

As classes da ODN estão relacionadas com as perdas no caminho ótico e podem ser esquematizadas através da tabela 2.5:

Tabela 2.5: Classes dos diferentes ODN. [12]

	Classe N1	Classe N2	Classe E1	Classe E
Miníma perda do caminho ótico (dB)	14	16	18	20
Máxima perda do caminho ótico (dB)	29	31	33	35
Máxima diferença entre caminho ótico (dB)	15			

2.4 Transcetores no contexto NG-PON2

Nesta secção são descritos os tipos de recetores e transmissores óticos existentes para a tecnologia NG-PON2, o seu funcionamento e as suas principais características. Serão ainda abordados os módulos de encapsulamento compacto mais comuns nas redes óticas existentes.

2.4.1 Interfaces conectáveis de alta velocidade de entrada/saída

Com a evolução da tecnologia e de modo a facilitar a standardização, foram desenvolvidos transcetores em formato compacto. Este modo de encapsulamento torna-se vantajoso tanto para os clientes como para os fabricantes, uma vez que com estes dispositivos o sistema fica mais fácil de configurar consoante as necessidades de cada cliente, as atualizações de serviços e a manutenção tornam-se mais fáceis.

Estes transcetores podem ser divididos de acordo com o seu encapsulamento, sendo que hoje em dia os mais usados são: SFP, (*Small Form-factor Pluggable*), SFP+ e os XFP, (*10*

Gigabit Small Form Factor Pluggable). Estes são usados para comunicações a alta velocidade de forma a suportar o rápido crescimento das taxas de informação. De modo a facilitar a estandardização, estas interfaces usam um encapsulamento padrão, permitindo ser um equipamento flexível, podendo suportar várias taxas de dados e protocolos.

Consoante a aplicação, estas interfaces podem ter diferentes tipos de caixas. Na figura 2.7 encontram-se quatro tipos de caixas. Onde as ilustrações de cima mostram as caixas com menos densidade e mais espaço entre módulos e as caixas em baixo ilustram as caixas com maior densidade. As combinadas, têm um menor espaçamento entre caixas comparativamente com as de porta individual, aproveitando melhor o espaço da placa. De modo a aumentar ainda mais a densidade de caixas, é possível, empilhar em ambos os lados da placa PCB, *Printed Circuit Board*, normalmente conhecidas como caixas *Belly-to-Belly* ou podem ser empilhadas em duas filas, no mesmo lado da placa PCB. [13]

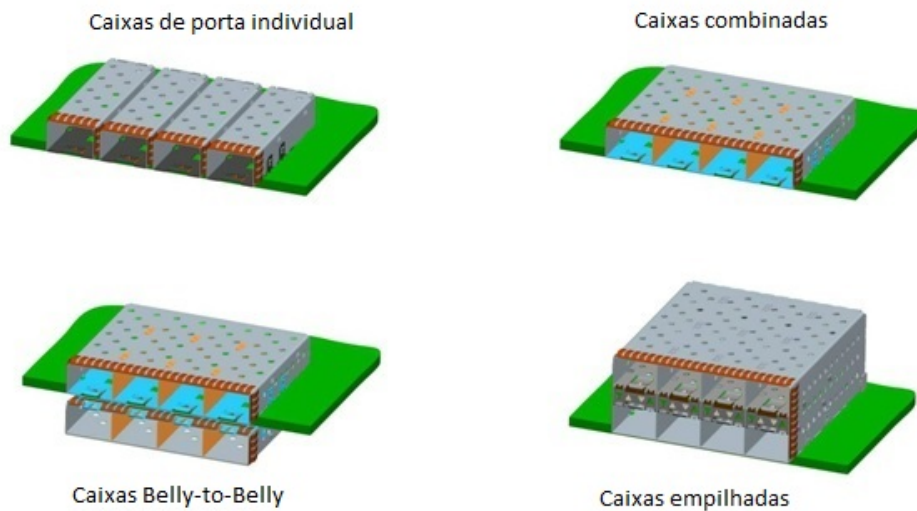


Figura 2.7: Portas típicas para interfaces conectáveis. [13]

Consoante a distância de propagação desejada, estes transdutores distinguem-se pelas diferentes siglas, assim para comunicações até 400 m e com o intuito de conectar duas ligações *Ethernet* serão usados transdutores *Short-Reach* (SR). Para comunicações entre edifícios com fibras mono-modo e distâncias até 10 km usam-se transdutores *Long-Reach* (LR). Para comunicações entre cidades ou localidades e para uma distância até 40 km utilizam-se os transdutores *Extended-Reach* (ER). Por fim, também conhecidas como *Extended-Reach*, mas agora com a sigla ZR, estas são em tudo parecidas as anteriores com a alteração de conseguirem alcançar distâncias de 80 km. Depois de perceber o significado dos transdutores existentes no mercado, é possível verificar que os que se enquadram na tecnologia NG-PON2, em estudo, são os *Extended-Reach* (ER). [14]

Na tabela 2.6 são apresentadas as características mais importantes de alguns transdutores disponíveis para o NG-PON2:

Tabela 2.6: Tabela com dispositivos SFP+ e XFP para a tecnologia NG-PON2

Dispositivo	Comprimento de onda (nm)	Sensibilidade (min/max) (dBm)	Potência LASER (min/max) (dBm)	Distância (km)
SFP+ Cisco SFP-10G-ER	1530 até 1565	-15.8/-1	-4.7/+4	40
SFP+ Arista 10GBASE-ER	1597.95 até 1529.94	-15.0/-1	-4.7/+4	40
XFP RAD XFP-5D-20	1561.42	-15.8/-1	-4.7/+4	40
XFP RAD XFP-5D-59	1530.33	-15.8/-1	-4.7/+4	40

2.4.2 SFP e SFP+ (*Small form-factor pluggable*)

Os transdutores SFP são utilizados para comunicação entre dispositivos, tais como, *switch*, *routers* e cabos de fibra ótica e são responsáveis por converter sinais elétricos em óticos e vice-versa. Suportam ritmos de transmissão acima de 5 Gb/s, são fisicamente compactos e de fácil manuseamento, permitindo trocas entre módulos de forma fácil e tornando a atualização e manutenção de todo o sistema mais eficaz. Após o SFP e com a necessidade de resposta ao crescimento das taxas de dados, surgiu o SFP+ capaz de suportar 10 Gb/s. Este tem o mesmo tamanho que o módulo antigo, permitindo reutilizar as caixas existentes. No entanto, internamente, o módulo SFP+ requer mais circuitos e está mais preenchido que o anterior. [15]

2.4.3 XFP (*10 Gigabit Small form-factor pluggable*)

Os módulos XFP, ao contrário dos SFP foram os primeiros a suportar ligações de 10 *Gigabit* Ethernet, uma vez que os SFP apenas suportavam acima de 5 Gb/s. Assim como os módulos anteriores, estes também são fisicamente compactos, de fácil manuseamento e permitem trocar de módulos facilmente. Tipicamente operam nas gamas de comprimento de onda de 850 nm, 1310 nm ou 1550 nm. Ao contrário dos módulos anteriores, que foram desenvolvidos de modo a estandardizar as caixas, estes tem uma dimensão superior aos módulos SFP e SFP+. Assim as principais características destes módulos são: suportar taxas de bits entre 9.95 Gb/s até 10.5 Gb/s, assegurar ligações até 40 km em ligações de fibra mono-modo e o seu fácil manuseamento permitindo trocas e atualizações de modo simples. [16]

2.4.4 *Transmitter Optical Sub-Assemblies*

Um transmissor ótico é responsável por converter o sinal elétrico em sinal ótico para posteriormente ser enviado pelo circuito, os componentes principais são um LASER, (*Light*

amplification by stimulated emission of radiation), normalmente um DFB, (*Distributed Feedback Laser*), um guia de ondas de rádio-frequência e resistências para todo o sistema estar adaptado. Estes, normalmente, estão compactados em interfaces conectáveis, como XFPs. [17]

Os parâmetros mais relevantes dos transmissores óticos são a eficiência da conversão elétrica-ótica e a eficiência do acoplamento ótico entre o transmissor e a fibra. [18]

A figura 2.8 mostra a estrutura de um TOSA, (*Transmitter Optical Sub-assemblies*):



Figura 2.8: *Transmitter Optical Sub-Assemblies*. [19]

2.4.5 Receiver Optical Sub-Assemblies

Um recetor ótico consiste num detetor ótico, usualmente um díodo PIN ou APD que converte o sinal ótico em elétrico. Contudo, este sinal depois de convertido, normalmente é bastante fraco, sendo que o detetor ótico é seguido de várias fases de amplificação e acondicionamento. A corrente gerada por um detetor PIN, (*positive-intrinsic-negative*) ou APD, (*Avalanche Photodiode*), é fraca, na ordem dos μA ou menos, logo um sinal tão fraco não pode ser usado diretamente, precisando de amplificação. Deste modo, após o detetor ótico é adicionado um pré-amplificador, conhecido como amplificador de transimpedância TIA, (*Transimpedance Amplifier*). Sendo que, os parâmetros mais importantes destes recetores são a responsividade que é a eficiência da conversão ótica para elétrica e a eficiência do acoplamento ótico entre a fibra e o recetor. [18]

A figura 2.9 mostra a estrutura de um ROSA, (*Receiver Optical Sub-assemblies*):



Figura 2.9: *Receiver Optical Sub-assemblies*. [20]

2.4.6 Bidirectional Optical Sub-Assemblies

De modo a tornar a transmissão de informação mais eficiente, foi criado um transmissor bidirecional sobre uma única fibra, permitindo que as empresas poupem dinheiro, uma vez que terão que usar um número bastante mais reduzido de fibras. Assim, foi criado o BOSA, este consiste na junção de um TOSA e um ROSA, no mesmo encapsulamento de modo a poderem ser feitas ligações bidirecionais, com um filtro WDM de modo a suportar dois comprimentos de onda em cada fibra. Este deve satisfazer tanto a potência ótica de transmissão como a sensibilidade de receção. [21]

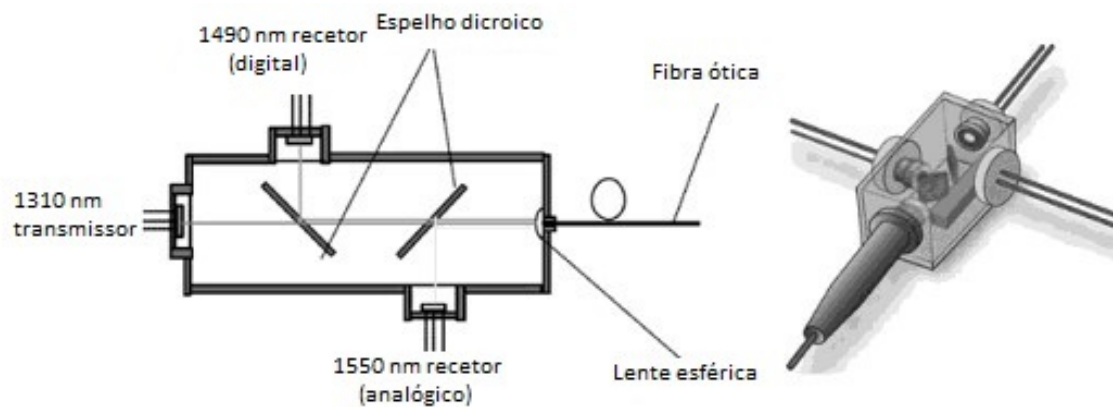


Figura 2.10: Estrutura interna de um BOSA. [21]

2.5 Componentes óticos

Nesta secção são apresentados os principais componentes existentes nas redes óticas no contexto da tecnologia NG-PON2 visando a modulação direta. Entre eles encontram-se os transmissores modulados diretamente, recetores óticos e fibra ótica, percebendo as suas vantagens e desvantagens.

2.5.1 Transmissores modulados diretamente

Com o aumento das taxas de informação transmitidas diariamente em todo o mundo e com o avanço das tecnologias elétricas e óticas, o uso de luz, através de fibra ótica para o transporte de informação tornou-se bastante vantajosa, tanto a nível de taxas de transmissão como das distâncias das ligações, tomando assim o lugar de grande parte das ligações coaxiais existentes. Contudo, uma das principais funcionalidades dos sistemas óticos são as operações de modulação, que consiste em converter as altas taxas de dados elétricas em sinais do domínio ótico. [22]

Modulação é o método pelo qual a informação digital é enviada segundo uma portadora ótica. Com o aumento das taxas de dados tornou-se uma das aplicações fundamentais para conseguir de forma fácil e prática enviar grandes quantidades de informação em intervalos de tempo curtos. Como se pode ver pela figura 2.11, para os sistemas óticos é utilizada modulação direta ou externa consoante a aplicação, contudo no contexto desta dissertação apenas tem interesse a modulação direta. Na modulação direta, a informação é modulada diretamente sobre a corrente de controlo do LASER, fazendo com que o mesmo ligue e desligue consoante o nível lógico que se pretende enviar, este é um método simples e barato, permitindo comunicações a curtas distâncias.

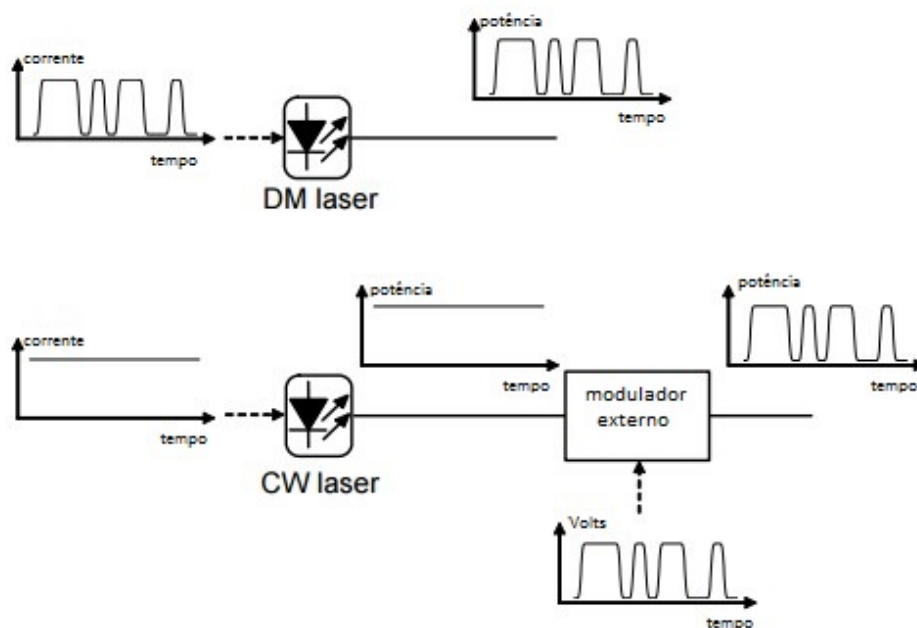


Figura 2.11: Modulação direta(cima) e modulação externa(baixo).[22]

Como ilustra a figura 2.12, na modulação direta a potência de saída do LASER depende da corrente que é injetada no LASER de acordo com a sua função transferência. Aumentando a corrente de polarização, o LASER apenas emite luz de emissão espontânea até atingir o valor de *threshold*. Acima deste valor a inversão da população de eletrões aumenta, levando ao aparecimento de luz de forma estimulada. Assim a potência de saída do LASER cresce linearmente com o aumento da corrente, até um ponto de saturação. O aumento do valor da corrente é responsável por uma potência de saída mais elevada, mas leva a *extinction ratio* (ER) mais baixos. Pelo que este valor deve ser cuidadosamente escolhido tendo em conta o objetivo final. Como já foi referido, o aumento da corrente de polarização leva a ER mais

reduzidos mas como os valores de corrente estão mais longe da corrente de *threshold* existe menos distorção, uma vez que o *chirp* induzido é menor, melhorando a relação sinal-ruído e consequentemente a qualidade do sinal.

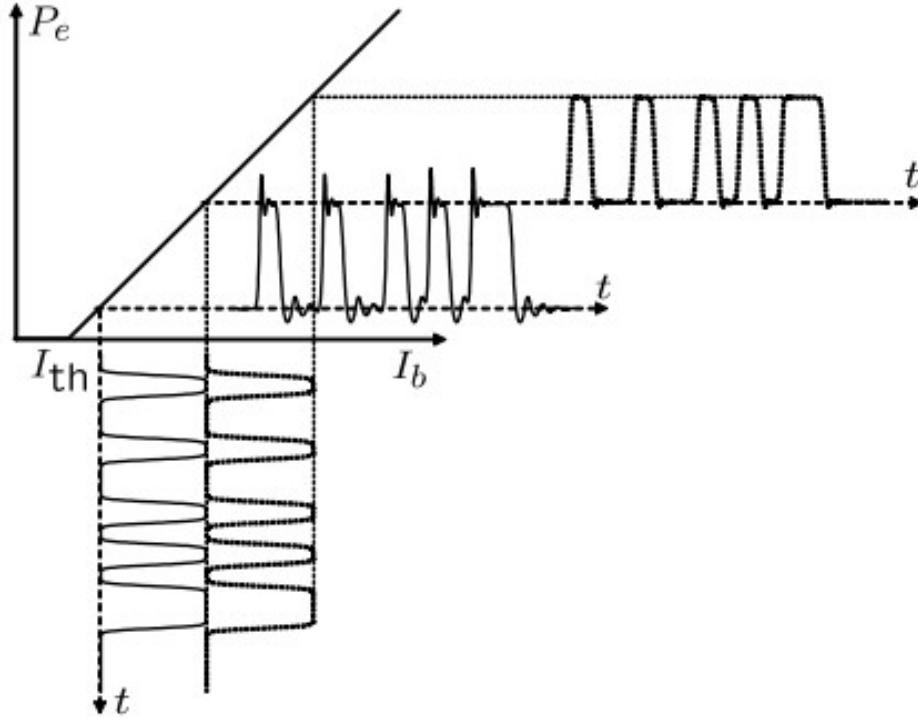


Figura 2.12: Conceito de modulação direta de um laser semiconductor.[22]

A modulação direta tem a vantagem de ser bastante simples a nível de transmissão, sendo que, tipicamente, para taxas de transmissão acima de 2.5 Gb/s este tipo de modulação leva ao aumento do efeito das não-linearidades e distorção e está limitada pela distância de transmissão, tornando um tipo de modulação usada em aplicações metro. [23]

2.5.1.1 Largura espectral associada ao laser

A largura espectral de um LASER é a largura do espectro ótico do sinal, sendo este parâmetro medido a metade da potência ótica do espectro ótico e é bastante dependente da qualidade do LASER usado. [24]

2.5.1.2 Curva característica potência em função da corrente de polarização do LASER

A curva característica de um LASER permite determinar para que valores o mesmo começa a funcionar e os valores a partir dos quais começa a saturar. Sendo possível verificar pela figura 2.12 que a partir de um certo ponto, conhecido como corrente de *threshold* o LASER começa a emitir potência, sendo que quando maior for o valor de corrente de polarização, maior será a potência de saída do mesmo, até saturar. Um fator a ter em conta na curva característica é o declive da mesma, uma vez que, quanto maior for o declive, maior é a

amplitude da luz emitida, levando a melhores ER e consequentemente a uma melhor relação sinal-ruído. [18]

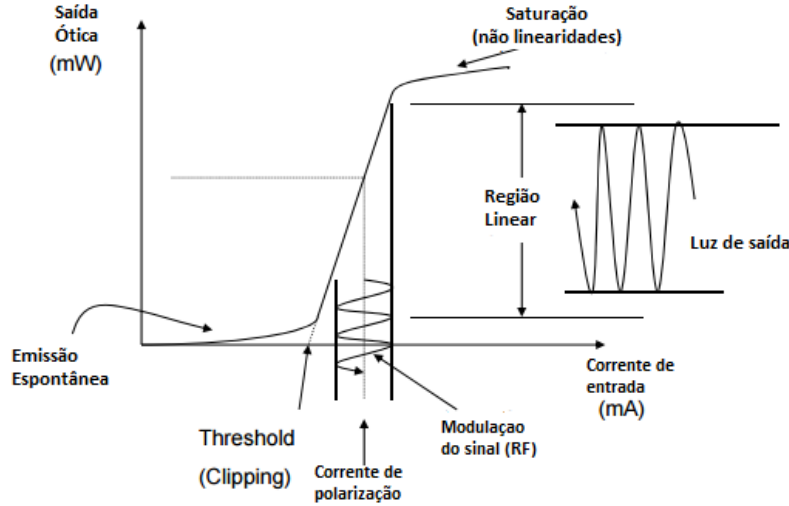


Figura 2.13: Variação da potência óptica de saída do LASER com a corrente de polarização. [25]

2.5.1.3 Ruído RIN

O ruído RIN, (*Relative Intensity Noise*), está relacionado com o ruído proveniente dos LASERs e das suas flutuações aleatórias. Este pode ser um fator limitativo na transmissão de informação, aumentando o BER, (*Bit Error Rate*), e degradando o sistema. Quando a potência do LASER é reduzida, este tem maioritariamente emissão espontânea, muito similar à emissão de um LED, (*Light Emitting Diode*), tendo um valor de ruído RIN elevado. Contudo acima do valor da corrente de *threshold* o LASER começa a ter maioritariamente emissão estimulada, diminuindo o valor do ruído RIN. [26]

2.5.1.4 Chirp

Como já foi referido, um dos problemas que surgem com o atraso nos níveis lógicos é o *chirp*. Existem dois tipos de *chirp*, o *chirp* transiente, que ocorre na transição de bits e aumenta o espalhamento do pulso na fibra e o *chirp* adiabático, que faz com que os bits de nível lógico 1 estejam deslocados dos bits de nível lógico 0. No caso da modulação direta, onde o LASER é polarizado perto da corrente de *threshold* o *chirp* dominante é o *chirp* transiente. [27]

A variação da frequência de saída instantânea em LASERs modulados diretamente pode ser mostrada pela equação seguinte:

$$\Delta\nu(t) = \frac{\alpha}{4\pi} \left(\frac{d}{dt} [\ln P_e(t)] + k P_e(t) \right) \quad (2.1)$$

onde α é o fator de aprimoramento da largura de linha e k o coeficiente do *chirp* adiabático. Onde se pode verificar que o *chirp* consiste em dois termos, o primeiro chamado de *chirp* transiente, existindo apenas quando a potência emitida varia com o tempo e o segundo chamado de

chirp adiabático responsável pelas diferentes emissões de frequências em estado estacionário quando são enviados níveis lógicos diferentes. [22]

2.5.1.5 *Chirp Managed Laser*

De modo a que os LASERs de modulação direta possam ser usados para altas taxas de dados e para distâncias de transmissão mais elevadas, foram desenvolvidos os CML, (*Chirp Managed Laser*). Estes são compostos por um LASER modulado diretamente, seguido por um formatador ótico, também conhecido como OSR, *Optical Spectrum Reshaper*. O LASER é polarizado bastante acima do valor de *threshold* de modo a reduzir o *chirp* transiente, levando a um *extension ratio* bastante pequeno em consequência da elevada corrente de polarização. Contudo, para aumentar o valor do *extension ratio* o sinal ótico passa pelo OSR que atenua os bits de nível lógico 0, aumentando o *extension ratio*, produzindo assim um diagrama de olho mais "limpo". Além de permitir taxas de transmissão mais elevadas que os DML, (*Direct Modulated Laser*), esta solução permite ainda distâncias de transmissão mais elevadas e é também uma solução menos complexa que a utilizada em tecnologias com moduladores externos. [28]

A figura 2.14 ilustra os componentes existentes dentro de um LASER CML.

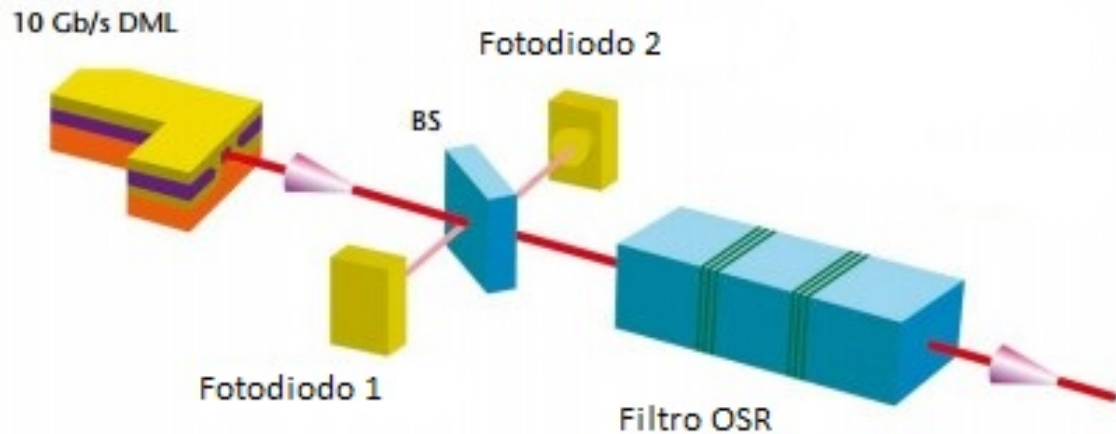


Figura 2.14: Princípio de operação de um CML. [27]

2.5.2 Recetores óticos

Os recetores óticos são dispositivos usados para a deteção de luz com a principal característica de transformar um sinal ótico em elétrico, que têm como requisitos básicos, o baixo custo, baixo ruído, uma rápida resposta e boa sensibilidade aos comprimentos de onda requeridos. Assim nas secções seguintes são apresentados e analisados dois tipos de recetores utilizados nos sistemas óticos, bem como as suas principais características. [29]

2.5.3 Ruído em recetores óticos

Os recetores óticos tem associado vários tipos de ruído, tais como, ruído quântico, térmico e de corrente escura. [30]

O ruído quântico está relacionado com a foto-deteção em si e o valor quadrático médio pode ser dado por:

$$\langle i_{shot}^2 \rangle = 2qI_p\Delta f \quad (2.2)$$

Onde q é a carga do eletrão, I a corrente quântica e Δf a largura de banda do ruído.

Enquanto que, o ruído térmico, está relacionado com a variação da resistividade com a temperatura devido aos componentes resistivos de polarização do recetor e o valor quadrático médio pode ser dado por:

$$\langle i_{ther}^2 \rangle = \frac{4kT\Delta f}{R} \quad (2.3)$$

Onde k é a constante de Boltzmann, T a temperatura, Δf a largura de banda do ruído e R a resistência.

O último, ruído de corrente escura, deve-se a fugas de corrente mesmo na ausência de luz e o valor quadrático médio pode ser dado por:

$$\langle i_{dark}^2 \rangle = 2qI_d\Delta f \quad (2.4)$$

Onde q é a carga do eletrão, I a corrente escura e Δf a largura de banda do ruído.

2.5.4 Fotodetector PIN

O fotodetector do tipo PIN é um recetor baseado num junção pn com material intrínseco colocado entre os dois tipos de semiconductor. Nestes díodos a região intrínseca é bombardeada com portadores de carga das regiões p e n até se atingir um equilíbrio, começando a conduzir corrente. É de notar que as regiões p e n são menores que a região intrínseca, sendo que grande parte da absorção da luz é processada nesta região, aumentando a eficiência e a responsividade do foto-díodo. [29]

Estes fotodetectores caracterizam-se por serem baratos, contudo, tem uma fraca performance para transmissões a longas distâncias e tem como ruído predominante o ruído térmico.

2.5.5 Fotodetector de Avalanche

O fotodetector de avalanche, comumente conhecido como APD, funciona de forma semelhante aos díodos PIN, contudo são mais complexos e caros que os anteriores e têm algumas vantagens, tais como, estes díodos têm um ganho associado, conseguem detetar um sinal mais fraco, e são mais sensíveis. Todavia, necessitam de uma corrente de polarização superior, tem mais ruído associado e são mais caros. [29]

O processo de avalanche acontece devido à forte corrente de polarização que faz com que os eletrões ganhem energia suficiente para provocar pares eletrões-lacunas secundários, que por sua vez irão gerar outros, provocando assim um efeito de avalanche. Sendo que, nestes díodos o ruído dominante é o ruído quântico. [31]

2.5.6 Eficiência Quântica

A eficiência quântica dos díodos relaciona a probabilidade de um fóton incidente no dispositivo gerar um par elétron-lacuna sendo dado por:

$$\eta = \frac{\text{eletrões} - \text{lacunas gerados no detector}}{\text{fótons incidentes}} \quad (2.5)$$

2.5.7 Responsividade

A responsividade de um foto-detector é a relação entre a corrente produzida e a potência de luz incidente no díodo e está diretamente relacionada com o seu modelo e com o comprimento de onda. A figura 2.15 mostra a dependência da responsividade com o comprimento de onda para Sílica, Germânio e Arsenieto de Gálio, entre outros, sendo possível concluir que a responsividade aumenta com o comprimento de onda até um máximo, dependendo do componente químico, isto porque passam a existir mais fótons presentes para a mesma potência ótica, sendo que depois tem uma queda abrupta na responsividade. [32]

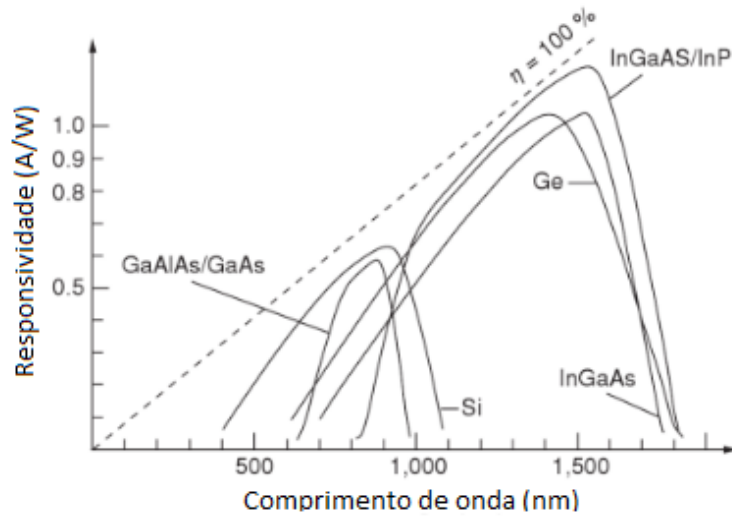


Figura 2.15: Dependência da responsividade com o comprimento de onda.[32]

A responsividade de um foto-díodo do tipo PIN é o rácio entre a foto-corrente gerada e a potência ótica incidente, determinada na região linear da resposta. No caso dos foto-díodos a responsividade é tipicamente maior na região de comprimentos de onda onde a energia dos fótons é superior à energia de banda proibida e pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$R = \eta \frac{q}{h\nu} \quad (2.6)$$

onde $h\nu$ é a energia do fóton, η a eficiência quântica e q a carga do elétron.

Relativamente à responsividade de um foto-díodo do tipo APD a fórmula é em tudo semelhante à anterior, contudo acrescenta de um valor M que multiplica pela equação, conhecido como fator de multiplicação que está relacionado com o ganho do próprio APD. [31]

2.5.8 Largura de banda

A largura de banda é uma das características mais importantes dos foto-detetores e está relacionada com o tempo de subida e descida dos níveis lógicos. Sendo que este parâmetro é tipicamente limitado pelos parâmetros elétricos, tais como condensadores associados ao foto-díodo. [33]

Assim, o valor da largura de banda para 3dB do foto-díodo é dado por:

$$B = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.7)$$

Sendo R o valor da resistência e C o valor do condensador utilizado e da capacidade de junção P-N do LASER.

2.5.9 Fibra Ótica

A fibra ótica é usada como meio de transporte de informação a longas distâncias. Esta tem uma capacidade bastante superior aos cabos elétricos e as suas perdas são da ordem de 0.2 dB/km para a sílica permitindo que a informação percorra muitos quilómetros sem que seja necessário amplificar o sinal. Dentro das fibras óticas estas podem ser classificadas como mono-modo e multi-modo, diferenciando-se no número de modos que são propagados em cada uma das fibras e na distância de propagação, sendo que nas fibras mono-modo apenas um modo é propagado, possuindo um núcleo de menor diâmetro em comparação com as fibra multi-modo. Relativamente à distância de propagação, as fibras mono-modo são usadas para grandes distâncias, enquanto que as fibras multi-modo são usadas para distâncias mais curtas. Contudo, e apesar das suas muitas vantagens, existem propriedades lineares e não lineares que vão afetar a qualidade da transmissão. [34]

2.5.9.1 Atenuação

A atenuação é a redução de potência ótica enquanto a luz atravessa a fibra ótica. Quanto maior a distância mais o sinal ótico é atenuado, sendo que este parâmetro é apresentado em dB/km. Este valor depende do tipo de fibra utilizado e do comprimento de onda, como é possível verificar pela figura 2.16. Normalmente, as fibras monomodo operam nas regiões entre 1310 nm ou 1550 nm, onde a atenuação é menor tornando estas as melhores opções para as comunicações a longas distâncias. [34]

Relativamente à atenuação existem três tipos de causas: Espalhamento, Absorção e por Flexão.

A atenuação por espalhamento é a reflexão que existem de pequenas quantidades de luz em todas as direções durante a viagem pela fibra ótica, sendo que algumas partes da luz escapa para fora do núcleo da fibra enquanto alguma viaja em sentido contrário ao pretendido. A atenuação por absorção ocorre por certas impurezas existentes na fibra ótica, tais como partículas de metal ou humidade presas no vidro. A humidade ocorre naturalmente nas fibras óticas sendo que tem um pico conhecido como "*water peak*", como se pode ver pela figura 2.16 perto dos 1385 nm. Relativamente à atenuação por flexão existem duas formas, microflexão e macroflexão. A primeira refere-se a distorções microscópicas no núcleo da fibra resultantes por apertos ou por objetos colocados por cima que possam alterar a forma da fibra. A segunda resulta de uma flexão bastante acentuada da fibra, criando um ângulo bastante pequeno para

a luz ser refletida de novo para o núcleo da fibra, causando que alguma parte da luz escape para fora do núcleo resultando em atenuação.

Assim, a atenuação total pode ser calculada através da equação seguinte:

$$P(x) = P_0 e^{-a_p \cdot x} \quad (2.8)$$

Onde P_0 é a potencia inicial do sinal, a_p é o coeficiente de atenuação na fibra e x é a distância percorrida. [35]

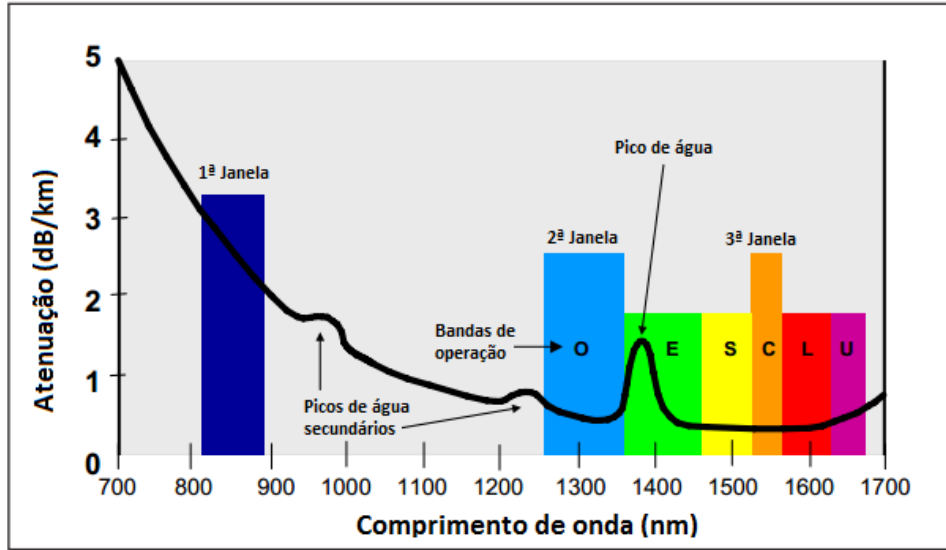


Figura 2.16: Relação entre a atenuação e comprimento de onda na fibra. Imagem adaptada da referência [36]

Através da figura 2.16 é possível verificar as três janelas onde a atenuação é mais baixa e onde maior parte das redes óticas se concentraram para o planeamento dos seus comprimentos de onda. Atualmente a mais usada é a terceira janela que se situa entre os 1500 nm e os 1600 nm pela sua baixa atenuação de aproximadamente 0,2 dB/km.

2.5.9.2 Dispersão cromática

A dispersão cromática representa o aumento na frequência do pulso de luz durante a viagem numa fibra ótica. Com este aumento os pulsos começam a sobrepor-se aumentando a interferência entre bits vizinhos, levando a que o recetor não consiga distinguir os diferentes pulsos.

A dispersão cromática subdivide-se em duas componentes, a dispersão no material e a dispersão no guia de onda. A dispersão material está relacionada com a variação do índice de refração da sílica com a frequência, causando velocidades de grupo diferentes, levando ao alargamento do sinal. A dispersão no guia de onda está relacionada na forma como a energia está distribuída entre o núcleo e a bainha da fibra. Através da figura 2.17 é possível verificar que as duas componentes da dispersão cromática tem comportamentos opostos com o aumento do comprimento de onda, sendo que para o comprimento de onda de 1310 nm a dispersão cromática é aproximadamente nula, para valores inferiores de comprimentos de onda é negativa e para valores superiores de comprimento de onda é positiva. É ainda possível verificar

que para o comprimento de onda de 1550 nm o valor da dispersão é de aproximadamente 17 ps/nm km. [37]

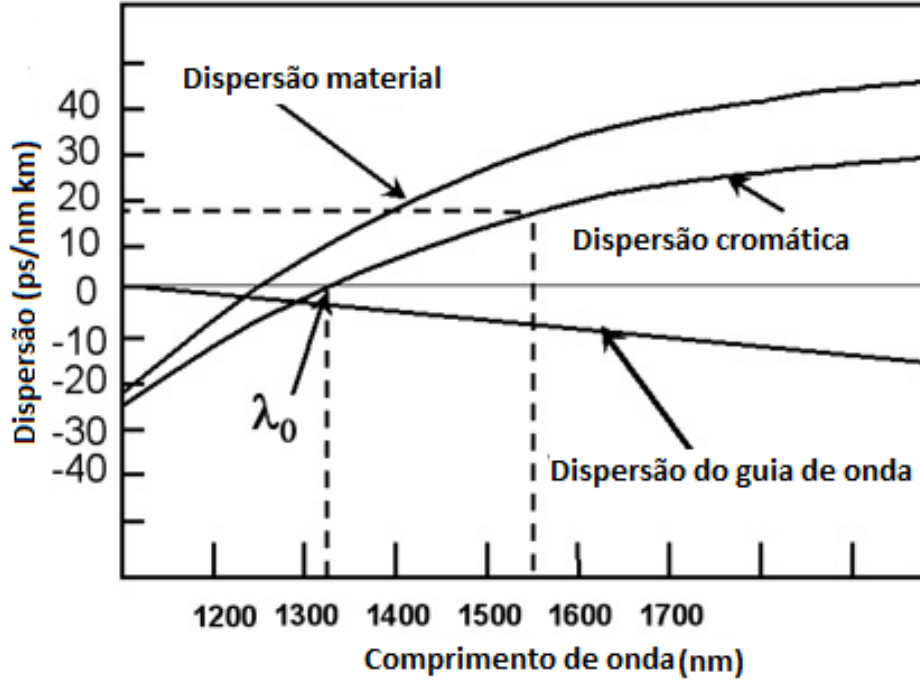


Figura 2.17: Dispersão cromática em função do comprimento de onda. [38]

Este parâmetro causa um limite de transmissão, que pode ser calculado pela seguinte fórmula, considerando modulação externa em amplitude OOK-NRZ, (*Non-return-to-zero*):

$$L < \frac{c}{2B^2\lambda_0^2|D|} \quad (2.9)$$

sendo c o valor da velocidade da luz, B o *bit rate*, λ o comprimento de onda do pulso e D a dispersão.

Assim para um *bit rate* de 10 Gb/s, um comprimento de onda de 1550 nm e uma dispersão de 17 ps/nm km obtém-se um limite de transmissão de 36.7 km. Contudo se se considerar modulação direta este valor vem diminuído pelo fenómeno de *chirp*, uma vez que, o mesmo causa alargamento espectral. Caso se pretenda usar modulação direta a solução mais viável para obter um limite de transmissão elevado é usar um LASER CML que tem como função reduzir o *chirp* obtendo-se assim distâncias de transmissão muito próximas dos valores obtidos para moduladores externos.

2.6 Conclusões

Neste capítulo estudou-se as tecnologias precedentes ao NG-PON2 permitindo perceber a evolução da tecnologia ao longo dos anos. Em seguida, apresentou-se a tecnologia NG-PON2, começando pela motivação à criação da tecnologia, a sua arquitetura, características e analisando os gastos de potência. Através deste estudo, foi possível perceber e analisar o porquê

da escolha desta tecnologia e as vantagens inerentes à mesma em comparação com tecnologias anteriores.

Em seguida, foram abordados algumas das interfaces conectáveis no contexto da tecnologia NG-PON2, explicando o seu funcionamento, vantagens e desvantagens. Permitindo entender como é efetuado o envio e receção de informação num sistema ótico, assim como os dispositivos usados consoante a aplicação pretendida. Foram ainda abordados os transmissores, recetores e transdutores óticos explicando o seu funcionamento e os seus componentes principais.

Por fim, foram apresentados os componentes óticos presentes num sistema PON, tendo como foco os componentes usados experimentalmente. Assim, começou-se por perceber o funcionamento de um transmissor modulado diretamente, as suas características, vantagens e desvantagens. Após perceber as principais desvantagens dos mesmos, analisou-se uma solução capaz de solucionar o problema, os CMLs. Seguidamente abordou-se os recetores óticos usados mais frequentemente, os díodos PIN e APD, explicando o princípio de funcionamento de ambos, assim como, as suas principais diferenças. Como último ponto deste capítulo, apresentou-se as propriedades lineares da fibra ótica, uma vez que no trabalho experimental executado apenas se teve em conta as propriedades lineares da mesma, analisando-se a atenuação e dispersão cromática.

Capítulo 3

Resultados de simulação

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos através de simulação com o *software* VPI, tendo como objetivo analisar os parâmetros do sistema que podem ser alterados de forma a melhorar a performance do mesmo. Assim, como forma de tornar as simulações o mais realísticas possíveis, foram usados vários valores retirados das simulações experimentais feitas em laboratório, tais como: potência do LASER, largura de linha do LASER, *bit rate*, comprimento e dispersão da fibra, entre outros. Contudo, como não são introduzidas perdas ou ruídos externos, as simulações serão apenas um ponto de partida, para uma futura análise dos valores experimentais. Desta forma, foram realizados vários testes, para os casos, com e sem fibra ótica, de modo a verificar o impacto que a fibra ótica tem em todo o sistema. Todos os testes foram realizados segundo o plano de comprimentos de onda para a tecnologia TWDM-PON, usando um espaçamento entre canais de 100 GHz, a banda L para transmissão *downstream* e a banda C para transmissão *upstream*, como se pode ver na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Tabela com os comprimentos de onda da tecnologia TWDM-PON. [12]

Canal	<i>Upstream</i>		<i>Downstream</i>	
	Freq. Central (THz)	Comp. de onda (nm)	Freq. Central (THz)	Comp. de onda (nm)
1	195.6	1532.68	187.8	1596.34
2	195.5	1533.47	187.7	1597.19
3	195.4	1534.25	187.6	1598.04
4	195.3	1535.04	187.5	1598.89

Para as simulações efetuadas, apenas foi tido em consideração os comprimentos de onda de *upstream*, de modo a não tornar a análise muito exaustiva, uma vez que o único parâmetro a alterar seria a frequência central de emissão do laser.

3.1 TWDM-PON 10 Gb/s NRZ

De forma a caracterizar a direção *Upstream* da tecnologia TWDM-PON executou-se um *setup* através do VPI, sendo que, o apresentado na figura 3.1 é referente a uma caracterização com fibra ótica. Para a caracterização em *back-to-back* apenas se retirou a fibra ótica do *setup* apresentado.

Contudo, é de realçar que na simulação em questão fez-se duas abordagens, uma não utilizando parâmetros de *chirp* e uma utilizando, de modo a perceber o seu impacto no sistema. Estas duas abordagens tem o intuito de aproximar a simulação dos resultados experimentais obtidos em laboratório, para o caso dos LASERs caracterizados. Sendo possível posteriormente comparar os resultados obtidos através de simulação com os obtidos experimentalmente.

Para mais fácil compreensão, os parâmetros mais relevantes do esquemáticos são apresentados na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Parâmetros relevantes do sistema

Parâmetro	Valor	Unidade
Taxa de transmissão	10	Gb/s
Formato de Modulação	NRZ	
Potência de pico do LASER	10	mW
Coeficiente de atenuação na fibra	0.2	dB/km
Parâmetro de Dispersão na fibra	16	ps/(nm*km)
Comprimento da fibra	20	km
Foto-detetor	APD	
Ganho do APD	40	
Ruído Térmico	1.8e-12	A ²

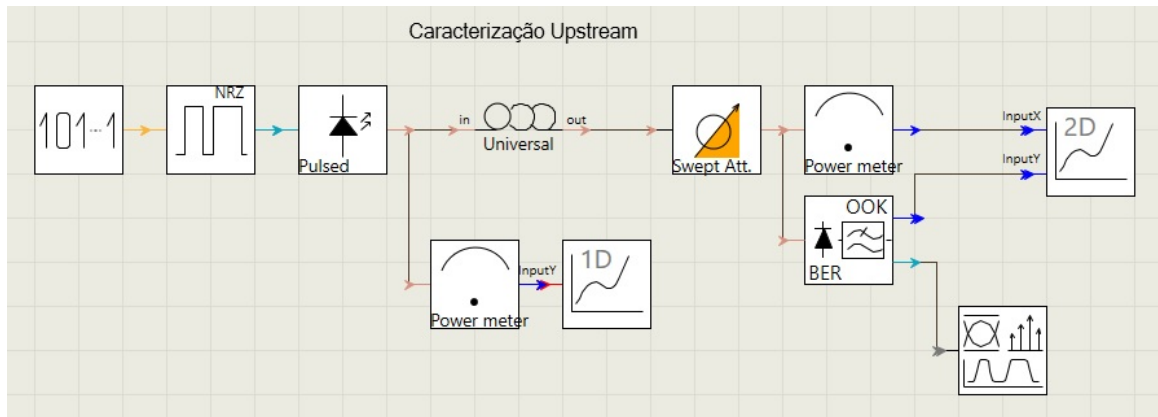


Figura 3.1: Esquemático para caracterização *Upstream* com 20 km fibra.

Como se pode verificar pela figura 3.1 o LASER encontra-se modulado diretamente com modulação NRZ, emitindo à frequência correspondente do primeiro comprimento de onda de *upstream*, segundo a norma da tecnologia TWDM-PON. Apenas foi considerado o primeiro comprimento de onda, uma vez que para os restantes comprimentos de onda, os resultados obtidos são iguais. Em seguida, o sinal passa por 20 km de fibra ótica e por um atenuador, onde é feito um varrimento na atenuação. Por fim, e tendo como objetivo caracterizar o recetor em função da potência, foi introduzido um recetor ótico, assim como, um medidor de potência, permitindo fazer a respetiva caracterização, potência ótica recebida em função da BER. Relativamente à caracterização em *back-to-back*, a única diferença, em comparação com a figura 3.1 foi o retirar da fibra ótica entre o LASER e o atenuador.

Iniciou-se o estudo percebendo o impacto que o índice de modulação tem no ER, assim, através do VPI variou-se o índice de modulação do LASER desde 0.1 até 1, e através do diagrama de olho resultante, anotou-se os valores das potências para os níveis lógicos '0' e '1'. Em seguida, através da expressão 3.1, calculou-se o ER.

$$ER = 10\log_{10} \frac{P_1}{P_0} \quad (3.1)$$

Onde P1 e P0 são os valores das potências para os níveis lógicos '1' e '0' respetivamente, sendo que a figura 3.2 mostra a relação entre o ER e o índice de modulação. [39]

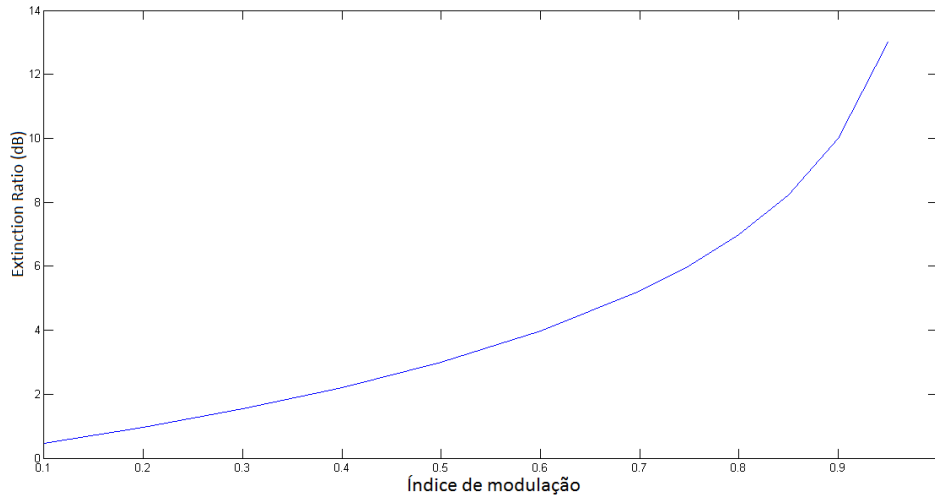


Figura 3.2: Variação do ER com o índice de modulação

Através da figura 3.2 é possível verificar que o aumento do índice de modulação do LASER faz com que o ER aumente, sendo que para índices de modulação maiores o aumento do ER é também maior. Sendo que o índice de modulação refere-se à relação entre a transmissão dos níveis lógicos, sendo que tendo um índice de modulação de 0.5 existe um equilíbrio entre o nível lógico 0 e 1 e para um índice de modulação de 1 obtém-se toda a potência ótica para os bits de nível lógico 1.

Em seguida, procedeu-se a caracterização do sistema em *back-to-back* e com 20 km de fibra, variando o índice de modulação de modo a perceber o seu impacto no sistema, contudo é de realçar que para esta caracterização não foram usados parâmetros de *chirp*, assim obtiveram-se os resultados da figura 3.3:

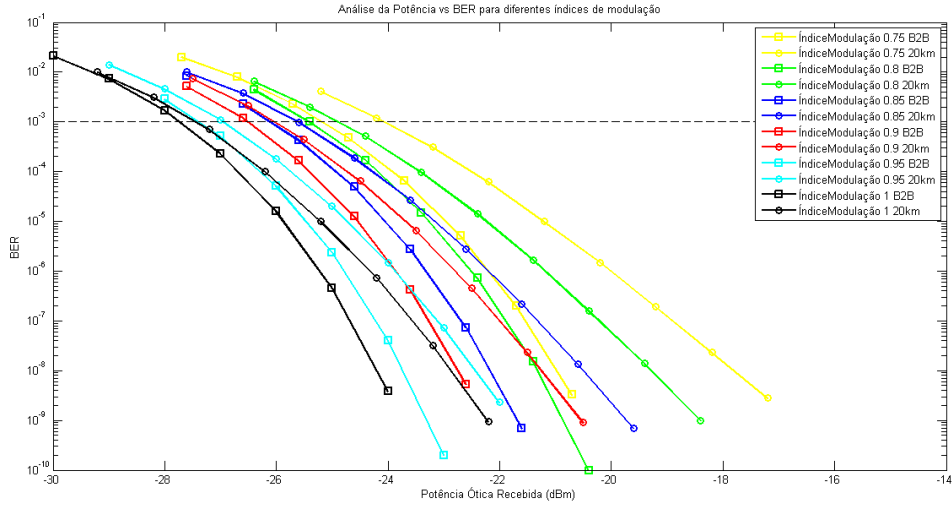


Figura 3.3: Análise da sensibilidade do sistema com a variação do índice de modulação com e sem fibra ótica.

Seguidamente, analisou-se as penalidades de potência existente entre curvas em *back-to-back*, sendo de destacar que os valores da potência óptica recebida são para um BER de 10^{-5} , sendo os resultados sumariados na tabela 3.3:

Tabela 3.3: Potência óptica recebida em *back-to-back* e respetiva penalidade de potência

Índice de Modulação	<i>Extinction Ratio</i> (dB)	Potência óptica recebida em back-to-back (dBm)	Penalidade de potência em back-to-back (dB)
1	—	-25.85	—
0.95	13.0	-25.46	0.39
0.90	10.0	-24.53	1.32
0.85	8.24	-24.05	1.80
0.80	6.99	-23.26	2.59
0.75	6.02	-22.96	2.89

Através da tabela anterior, é possível concluir que o aumento do índice de modulação leva a penalidades de potência entre as curvas em *back-to-back* cada vez menores. Isto porque, com o aumento do índice de modulação, aumenta também o ER e a diferença entre os níveis lógicos e também maior, melhorando a relação sinal ruído e por sua vez diminuindo a penalidade de potência.

Na tabela seguinte, 3.4, é possível observar os valores entre a penalidade de potência existente entre a simulação em *back-to-back* e com 20 km de fibra:

Tabela 3.4: Penalidade de potência entre curvas em *back-to-back* e com 20km de fibra ótica

Índice de Modulação	<i>Extinction Ratio</i> (dB)	Potência ótica recebida em back-to-back (dBm)	Potência ótica recebida com 20 km (dBm)	Penalidade de potência (dB)
1	—	-25.85	-25.20	0.65
0.95	13.0	-25.46	-24.73	0.73
0.90	10.0	-24.53	-23.74	0.79
0.85	8.24	-24.05	-23.15	0.9
0.80	6.99	-23.26	-22.24	1.02
0.75	6.02	-22.96	-21.20	1.76

Como é possível ver pela tabela anterior, o aumento do ER leva a uma diminuição da potência ótica requerida, melhorando não só as penalidades de potências existentes entre curvas com o mesmo ER, como também as penalidades para os casos em *back-to-back* e com 20 km de fibra.

Logo depois, efetuou-se a mesma caracterização, contudo agora utilizando parâmetros de *chirp*, de modo a obter resultados próximos dos experimentais, para o caso dos LASERs modulados diretamente. Para tal, utilizou-se os parâmetros típicos de *chirp* existentes na documentação do VPI, sendo estes apresentados na tabela 3.5: [40]

Tabela 3.5: Parâmetros de *chirp* utilizados na simulação

Parâmetro	Valor	Unidades
<i>Chirp</i> relativo ao ganho não linear	477.4	GHz/W
<i>Chirp</i> relativo à emissão espontânea	20.3	MHz W
Fator de enriquecimento da largura de linha	4	

O fator de enriquecimento de linha, é definido como o acoplamento entre a fase e a amplitude do sinal elétrico e influencia vários parâmetros do LASER, tais como, largura de linha, *chirp* sobre modulação e o comportamento do LASER quando existe *feedback*. Por fim, o *chirp* adiabático, pode ser dividido em dois fatores, o relativo ao ganho não linear e o relativo à emissão espontânea, sendo que o primeiro está relacionado com as não linearidades existentes na fibra ótica, muito dependente do valor da potência ótica imposta e o segundo está relacionado com o fato de nem toda a emissão ser estimulada aumentando assim o parâmetro de *chirp*. [40]

Sendo os resultados da figura 3.4, respectivos a uma análise com parâmetros de *chirp*:

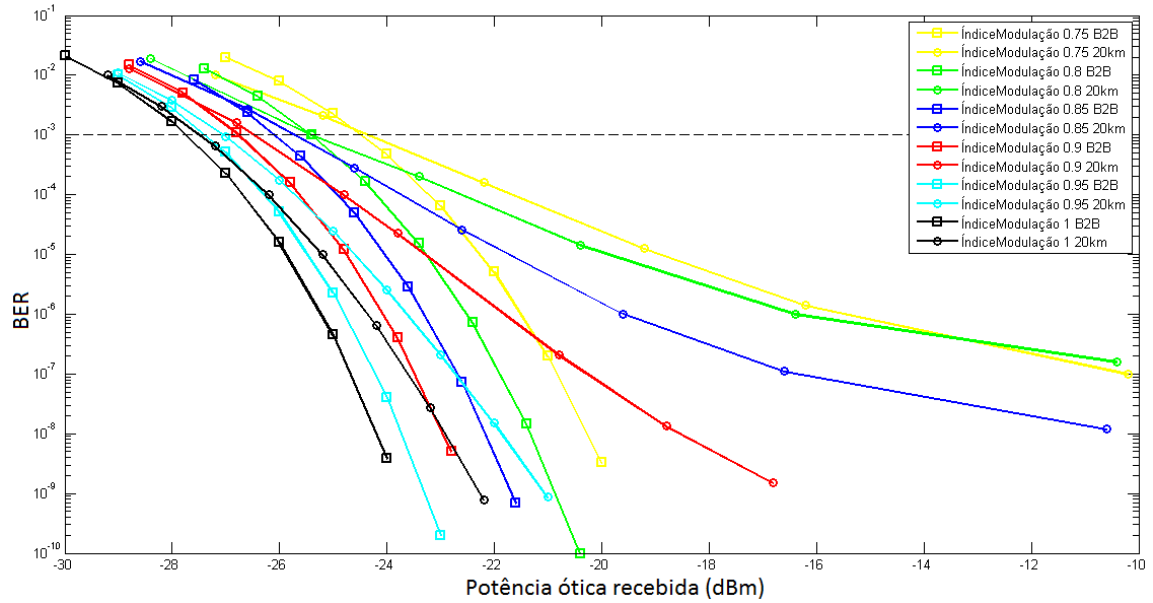


Figura 3.4: Análise da sensibilidade do sistema com a variação do índice de modulação com e sem fibra ótica utilizando parâmetros de *chirp*.

Através do gráfico anterior, é possível verificar o efeito do *chirp*, sendo muito preponderante quando se introduz fibra ótica, uma vez que o mesmo resulta no atraso dos níveis lógicos, juntando a isto o alargamento temporal imposto pela dispersão, a relação sinal-ruído vem bastante degradada, piorando bastante o BER. É ainda possível verificar que o efeito do *chirp* está também muito relacionado com o índice de modulação do LASER uma vez que, quanto menor for o índice de modulação, mais degradado estará o sinal.

Seguidamente, analisou-se as penalidades de potência existente entre curvas em *back-to-back*, sendo os resultados sumariados na tabela 3.6:

Tabela 3.6: Potência óptica recebida em *back-to-back* e respetiva penalidade de potência

Índice de Modulação	<i>Extinction Ratio</i> (dB)	Potência ótica recebida em back-to-back (dBm)	Penalidade de potência em back-to-back (dB)
1	—	-25.85	—
0.95	13.0	-25.47	0.38
0.90	10.0	-24.75	1.10
0.85	8.24	-24.04	1.81
0.80	6.99	-23.25	2.60
0.75	6.02	-22.25	3.60

Assim como na análise sem *chirp*, é possível concluir que o aumento do índice de modulação leva a penalidades de potência entre as curvas em *back-to-back* cada vez menores.

Isto porque, com o aumento do índice de modulação, aumenta também o ER e a diferença entre os níveis lógicos e também maior, melhorando a relação sinal ruído e por sua vez diminuindo a penalidade de potência.

Na tabela seguinte, 3.7, é possível observar os valores entre a penalidade de potência existente entre a simulação em *back-to-back* e com 20 km de fibra:

Tabela 3.7: Penalidade de potência entre curvas em *back-to-back* e com 20km de fibra ótica

Índice de Modulação	<i>Extinction Ratio</i> (dB)	Potência ótica recebida em back-to-back (dBm)	Potência ótica recebida com 20 km (dBm)	Penalidade de potência (dB)
1	————	-25.85	-25.20	0.65
0.95	13.0	-25.47	-24.60	0.87
0.90	10.0	-24.75	-23.28	1.47
0.85	8.24	-24.04	-21.72	2.32
0.80	6.99	-23.20	-19.85	3.35
0.75	6.02	-22.30	-18.9	3.40

Como é possível ver pela tabela anterior, o aumento do ER leva a uma diminuição da potência ótica requerida em ambos os casos, contudo a mesma é mais preponderante no caso do sistema com fibra ótica pelas não-linearidades e distorção introduzidas. Aumentando também a penalidade de potência existente entre ambos os casos, com a diminuição do ER.

3.2 Conclusões

Neste capítulo efetuou-se a simulação da tecnologia TWDM-PON com e sem fibra ótica, para tal variou-se o valor do ER de modo a perceber o comportamento do sistema para diferentes valores e utilizou-se ainda o parâmetro de *chirp* com o objetivo de simular mais pormenorizadamente os transmissores diretamente modulados.

Este capítulo teve uma grande importância, pois apesar de não ter sido feita uma simulação exaustiva do *setup* usado em laboratório, permitiu estudar dois dos factores em destaque nesta dissertação, o impacto da variação do ER e o *chirp* associado aos LASERS diretamente modulados. Permitindo posteriormente, analisar os resultados experimentais e retirar conclusões de modo a comparar os mesmos com os obtidos através de simulação.

Capítulo 4

Resultados experimentais

Neste capítulo apresentam-se resultados obtidos em laboratório relativos à caracterização da tecnologia TWDM-PON, de modo a verificar a influência que a introdução de fibra ótica têm no sistema, assim como da variação do ER para diferentes LASERs. Serão testados vários LASERs, diretamente modulados, com o objetivo de perceber as vantagens e desvantagens inerentes aos mesmos. Sendo que, não foi possível obter *datasheets* ou informações dos LASERs antes de os caracterizar, uma vez que os mesmos foram fornecidos por empresas, sendo informação confidencial. Assim, não serão apresentadas referências ou fotografias dos mesmos.

Para tal, começou-se por caracterizar vários elementos do sistema separadamente para perceber o seu funcionamento e características, tais como, LASER, TEC, (*Thermoelectric Cooling*) e acopladores. De seguida, procedeu-se à caracterização do sistema com um TOSA e com um BOSA para a ONU, alterando o ER entre 4 e 6 dB e o sistema em *back-to-back* e utilizando 20 km de fibra ótica, de modo a perceber as limitações dos LASERs modulados diretamente.

Posteriormente, executou-se a mesma análise mas agora para um TOSA para a OLT analisando para um ER de 8.2 dB e com o sistema em *back-to-back* e utilizando 20 e 40 km de fibra ótica. Por fim, realizou-se uma comparação entre os LASERs analisados.

4.1 TOSA modulado diretamente 10 Gb/s NRZ

Para caracterizar os LASERs experimentalmente foi utilizado o *setup* da figura 4.1. Para uma mais fácil compreensão do *setup*, será feita uma breve introdução dos principais componentes. O *Pattern Generator* é responsável por criar um sinal de 10 Gb/s com modulação NRZ. Em seguida, a placa de teste MAX3949, recebe o sinal proveniente do *Pattern Generator* e através da sua interface gráfica (figura 4.2) é possível ajustar as correntes de polarização e modulação de modo a regular os valores de ER e BER, nesta placa é soldado o LASER que se pretende caracterizar. O TEC, *Thermoelectric Cooling*, é responsável pela variação do comprimento de onda, sendo que com o aumento da temperatura no TEC, o comprimento de onda do LASER sofrerá uma variação para valores superiores de comprimento de onda, como se pode ver pela figura 4.4. Em seguida, o sinal ótico passa por um acoplador onde a potência do sinal é dividida ao meio, sendo que metade da potência é entregue ao PIN onde é possível ver o diagrama de olho com a ajuda de um osciloscópio e a outra parte da potência, é novamente dividida, onde num lado é possível ver o pico de frequência do sinal através de um

OSA, (*Optical Spectrum Analyser*) e no outro, o sinal passa por 20 km de fibra ótica, seguido de um atenuador onde é feito o varrimento das potências, de modo a testar a sensibilidade do recetor. Depois, esse sinal passa por um último acoplador, onde, mais uma vez, é visto o pico de frequência do sinal através de um OSA e por fim, como recetor é usado um APD, através do modulo *Gryphon XFP*, que tanto pode ser usado como transmissor ou recetor, sendo que neste caso, apenas é usado como recetor, no qual foi testada a sensibilidade. Para testar o sistema em *back-to-back*, apenas foi necessário remover os 20 km de fibra ótica do sistema.

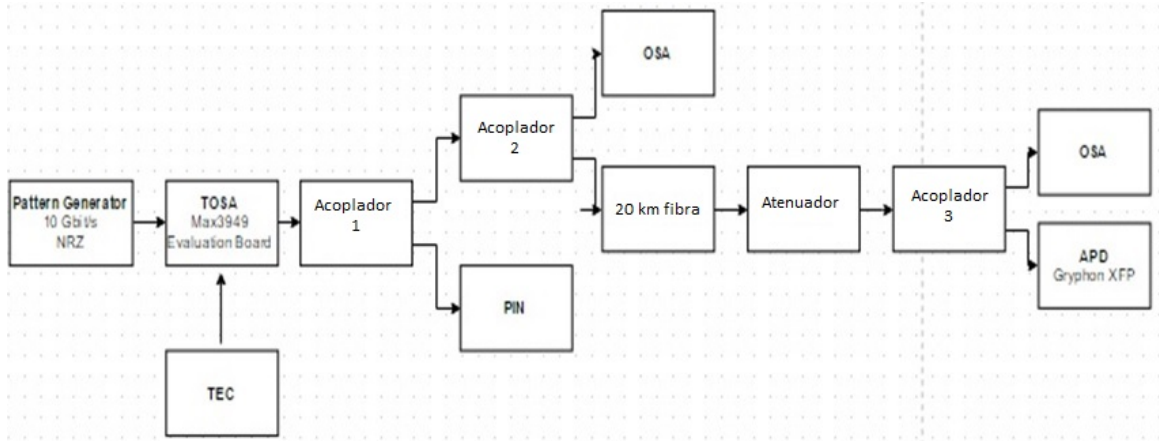


Figura 4.1: *Setup* experimental.

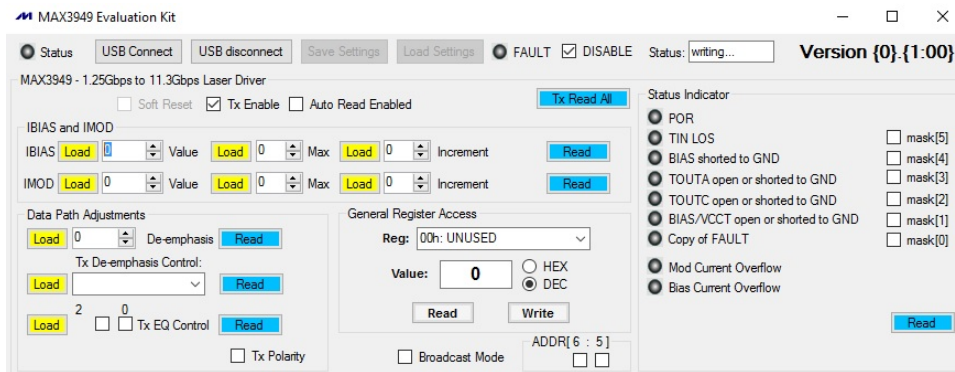


Figura 4.2: Interface gráfica da placa de teste MAX3949.

Antes de começar a caracterizar o sistema TWDM-PON propriamente dito, dois componentes foram caracterizados individualmente para perceber o seu funcionamento, sendo eles o TEC e o LASER.

Para a caracterização do LASER, estudou-se o seu comportamento em relação à potência de saída e à corrente de polarização. A placa de teste que suporta o LASER, MAX3949, tem como valor máximo de corrente 300 mA, contudo no TOSA apenas se utilizou como limite superior e inferior 105 mA e 23.4 mA para não danificar o LASER, assim, apenas foi tido em consideração para a caracterização do mesmo, os valores limite do mesmo. Para esta caracterização, o valor da corrente de modulação foi mantido a 83 mA. Assim, a curva de caracterização do LASER é a apresentada na figura 4.3, onde se pode verificar que a curva

apresentada é referente à região ativa do mesmo, sendo que para os valores da corrente de polarização de 80 mA a 100 mA já se verifica alguma saturação na potência de saída do LASER.

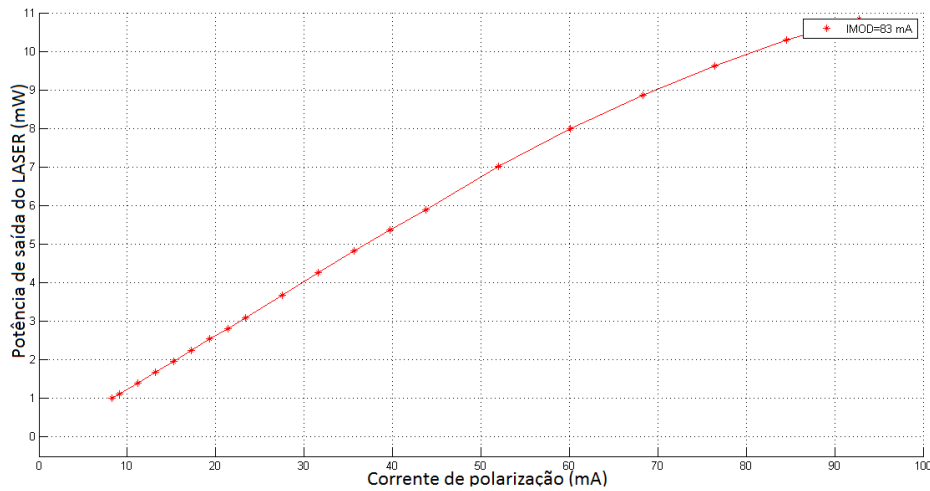


Figura 4.3: Curva característica potência de saída em função da corrente de polarização para LASER DML.

Para a caracterização do TEC foram tidos em consideração dois conjuntos de valores de correntes de polarização e de modulação de forma a analisar também o efeito que diferentes valores de correntes têm na variação do comprimento de onda. Como se pode ver pela figura 4.4, o aumento de temperatura por parte do TEC tem um efeito praticamente linear no aumento do comprimento de onda, sendo ainda possível verificar que para diferentes conjuntos de valores de correntes o sistema não sofre grandes variações no comprimento de onda. Este, é composto por um controlador Proporcional-Integrador-Derivador que compara a temperatura de saída com o valor de temperatura proposto, fazendo pequenas alterações na corrente imposta no *peltier* do LASER para chegar ao valor pretendido. Contudo, é de realçar que este dispositivo está desprotegido, sendo que pequenas perturbações no meio ambiente, produzem resultados diferentes de temperatura, o que faz variar o comprimento de onda.

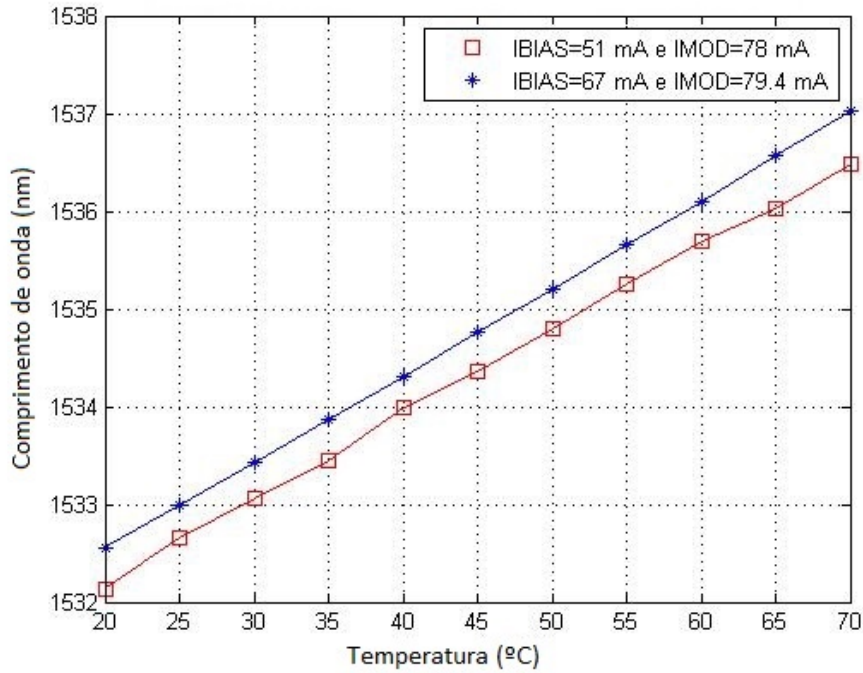


Figura 4.4: Caracterização do LASER com a variação da temperatura.

Foram ainda analisadas as perdas nos acopladores, onde teoricamente seria de esperar um valor 3 dB abaixo do sinal de entrada em cada uma das saídas dos acopladores, uma vez que se trata de acopladores 50/50, mas experimentalmente verificou-se que o valor obtido nas saídas dos acopladores encontra-se compreendido entre 3,5 e 4 dB.

Seguidamente, procedeu-se à caracterização do sistema individual das frequências 195.6 THz, 195.5 THz, 195.4 THz e 195.3 THz do sistema TWDM-PON. A norma desta tecnologia tem como requisitos um valor de ER de 6 dB e um BER de referência $1e-3$. Contudo, um valor inferior de ER pode ser admitido, compensando com um maior valor de potência de LASER. Tendo em conta as limitações do LASER, apenas foram tidos em conta ER de 4 e 6 dB, uma vez que para valores superiores a este o sinal fica bastante degradado, não preenchendo os requisitos da norma.

4.1.1 Análise do sistema para *Extinction Ratio* de 4 dB

Através do *setup* apresentado na figura 5.1 procedeu-se a caracterização do sistema, começando por variar o valor de temperatura no TEC até alcançar o primeiro comprimento de onda e variando os valores de correntes de polarização e modulação até alcançar os melhores valores para o ER pretendido, sendo posteriormente anotados os valores do comprimento de onda, temperatura, potência do LASER e do PIN e correntes de polarização e modulação, sendo os valores apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Tabela com os dados mais relevantes relativos aos quatro comprimentos de onda

Comprimento de onda (nm)	Temperatura (°C)	Potência laser (dBm)	Potência PIN (dBm)	Ibias (mA)	Imod (mA)
1532.45	25	9.10	4.18	43.4	41.4
1533.39	35	9.10	4.33	46.2	43.0
1534.12	43	9.15	4.04	48.7	46.2
1534.98	50.5	8.80	3.83	49.9	47.8

É necessário realçar que para obter o ER pretendido, existem diversos valores de correntes de polarização e modulação que poderiam ter sido usados, contudo certos valores apresentavam pior desempenho quando se fazia a caracterização do sistema com fibra ótica.

Apenas é apresentado um diagrama de olho uma vez que todos eles são bastante idênticos, no caso da figura 4.5 o diagrama de olho é o respetivo ao comprimento de onda de 1532.45 nm. Assim, como se pode verificar pela figura, o ER encontra-se dentro do estipulado, apresentando boas características a nível de *jitter*, distorção, relação sinal ruído, entre outros, em todos os casos.

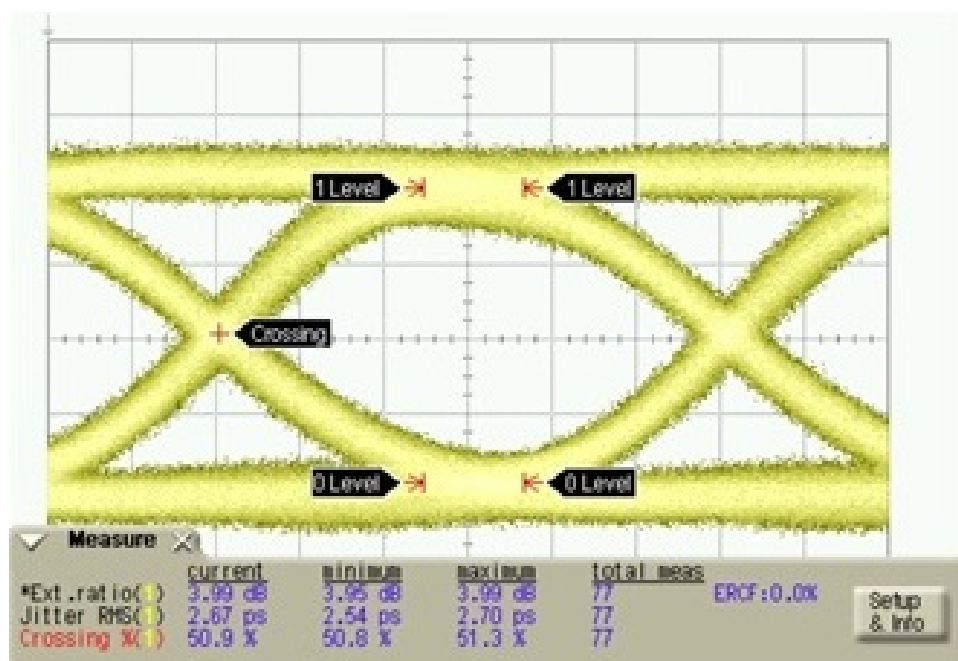


Figura 4.5: Diagrama de olho à saída do LASER.

Por fim, foram analisados os quatro canais de *upstream* em *back-to-back* e com 20 km de fibra ótica, relativamente ao BER e à potência ótica recebida, verificando-se que os mesmos encontram-se praticamente sobrepostos. Observando-se apenas ligeiras alterações quando se introduz fibra ótica no sistema, principalmente para potências mais elevadas, onde as não-linearidades da mesma começam a ser mais relevantes, sendo possível observar três valores diferentes de potências. Assim sendo, obteve-se penalidades de potência de 2.6 dB para o primeiro, segundo e terceiro comprimento de onda e 3.1 dB para o quarto comprimento de onda, como se pode ver pela figura 4.6.

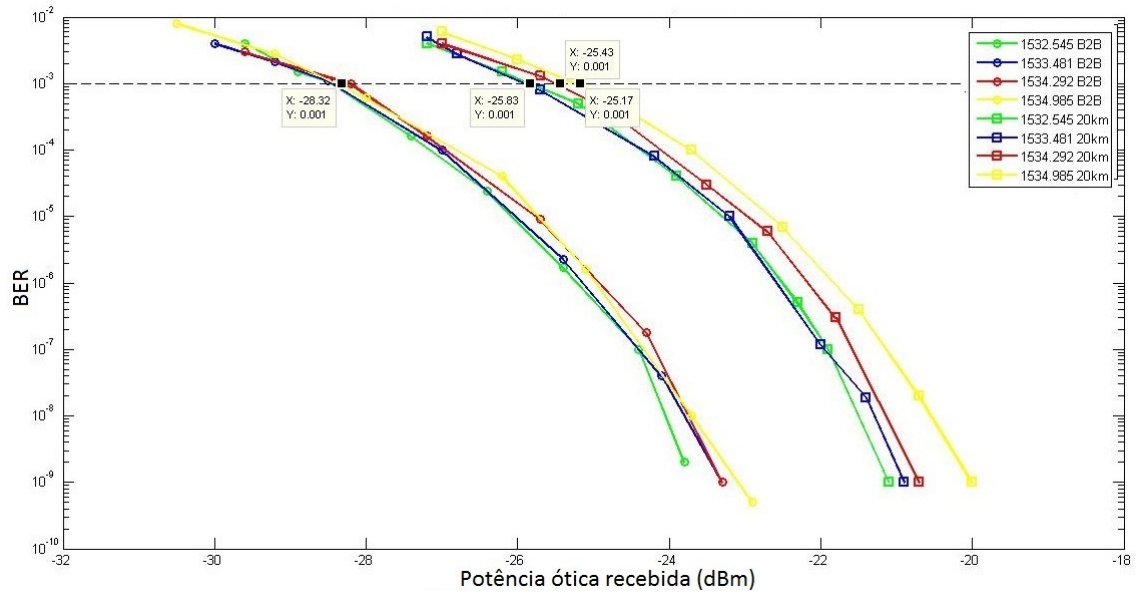


Figura 4.6: Análise entre a potência ótica recebida e o BER para ER de 4 dB.

4.1.2 Análise do sistema para *Extinction Ratio* de 6 dB

Em seguida, foi feita a mesma análise, executando o mesmo procedimento apresentado anteriormente, mas agora para o valor de ER de 6 dB, pretendido pela norma. Sendo apresentados os valores dos comprimentos de onda, temperatura, potências do LASER e do PIN e correntes de polarização e modulação, na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Tabela com os dados mais relevantes relativos aos quatro comprimentos de onda

Comprimento de onda (nm)	Temperatura (°C)	Potência laser (dBm)	Potência PIN (dBm)	Ibias (mA)	Imod (mA)
1532.55	25	9.70	4.60	47.9	66.6
1533.51	35	9.72	4.77	52.4	69.8
1534.37	43	9.61	4.55	56.2	69.8
1535.07	50.5	9.32	4.52	61.3	69.8

Como na situação anterior, apenas é apresentado um diagrama de olho pelos mesmos motivos, contudo neste caso a figura 4.7 é referente ao comprimento de onda de 1534.37nm, apresentando o valor do ER pretendido.

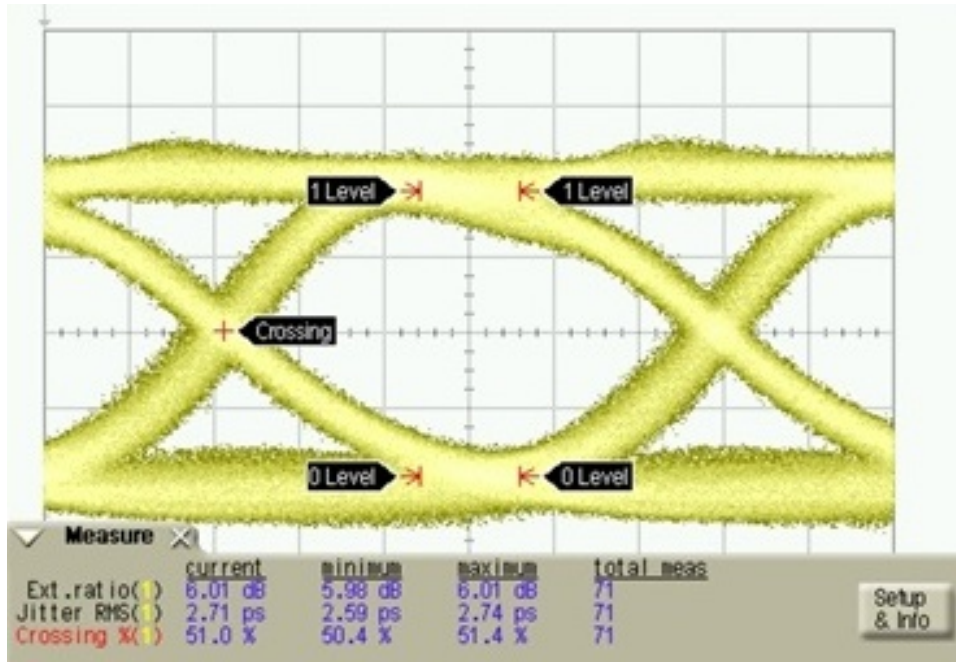


Figura 4.7: Diagrama de olho à saída do LASER.

Por fim, analisou-se as curvas de BER e potência ótica recebida verificando-se ligeiras alterações entre as respetivas curvas para diferentes comprimentos de onda, estas alterações podem estar relacionadas com o aumento das correntes de polarização e modulação, levando os mesmos para valores mais perto da corrente de *threshold* aumentando o ruído.

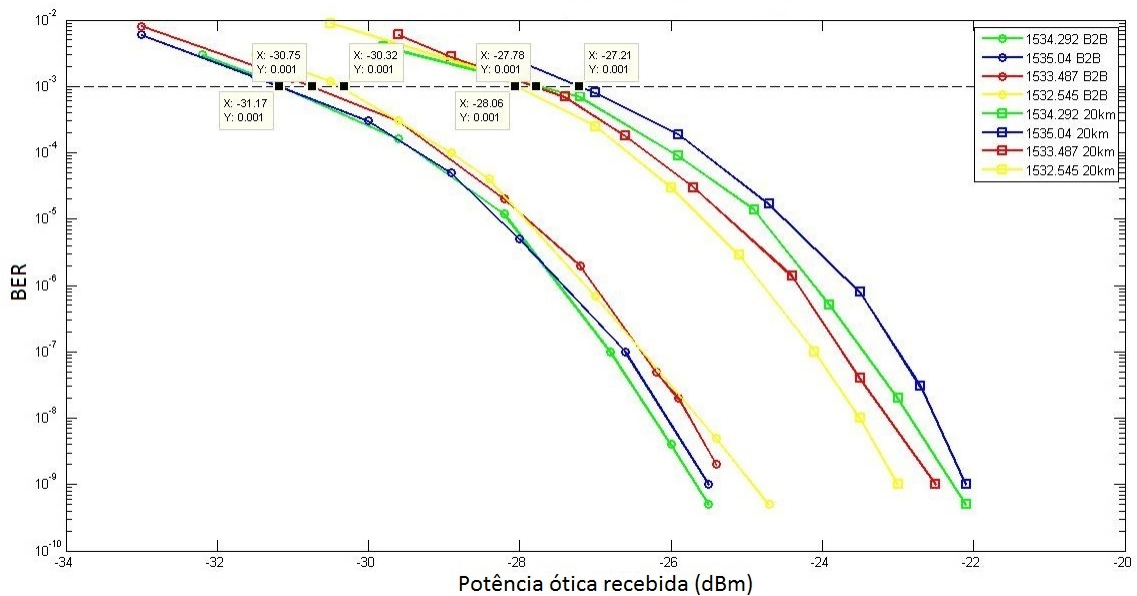


Figura 4.8: Análise entre a potência ótica recebida e o BER para ER de 6 dB.

Através da figura anterior é possível verificar que as curvas encontram-se praticamente

sobrepostas, existindo apenas uma diferença de 0.6 dB nos dois casos em análise para o BER de $1e-3$, contudo com o aumento da potência é notório que as curvas da análise com fibra ótica começam a dispersar-se, o que seria de esperar uma vez que as não-linearidades da fibra ótica são mais predominantes para potências superiores. É ainda possível verificar que as penalidades de potência entre as curvas em *back-to-back* e com 20 km de fibra são de 3.1 dB, 3.3 dB, 3.5 dB e 3.2 dB para o primeiro, segundo, terceiro e quarto comprimento de onda.

4.1.3 Conclusões TOSA Laser modulado diretamente 10 Gb/s NRZ

Após todos os resultados obtidos para o DML, é fundamental analisá-los para perceber o seu comportamento para os diferentes valores de ER. De modo a sintetizar apresentam-se duas tabelas com os valores mais importantes das duas análises efetuadas:

Tabela 4.3: Tabela com valores obtidos para um ER de 4 dB

Canal	Corrente de Polarização (mA)	Corrente de Modulação (mA)	Potência do laser (dBm)	Back-to-Back (dBm)	20 km (dBm)	Penalidade (dB)
1	43.4	41.4	9.1	-28.4	-25.8	2.6
2	46.2	43.0	9.1	-28.4	-25.8	2.6
3	48.7	46.2	9.2	-28.1	-25.5	2.6
4	49.9	47.8	8.8	-28.3	-25.2	3.1

Através da tabela 4.3 é possível observar que para obter os resultados pretendidos, foi necessário aumentar, em todos os casos, as correntes de polarização e modulação, contudo apenas para o canal 4 a penalidade de potência para um BER de $1e-3$ entre a análise em *back-to-back* e os 20 km de fibra é superior. Todavia, a máxima penalidade existente entre canais é de 0.5 dB o que é um valor bastante aceitável tendo em conta todos os fatores externos de ruído existentes.

Tabela 4.4: Tabela com valores obtidos para um ER de 6 dB

Canal	Corrente de Polarização (mA)	Corrente de Modulação (mA)	Potência do laser (dBm)	Back-to-Back (dBm)	20 km (dBm)	Penalidade (dB)
1	47.9	66.6	9.7	-31.2	-28.1	3.1
2	52.4	69.8	9.7	-31.2	-27.9	3.3
3	56.2	69.8	9.6	-31	-27.5	3.5
4	61.3	69.8	9.3	-30.5	-27.3	3.2

No caso da análise feita para um ER de 6 dB é possível observar que, assim como no caso anterior, as correntes de polarização e modulação aumentam com os canais, contudo neste caso, as penalidades são bastante próximas, existindo apenas uma diferença máxima de 0.4 dB entre o primeiro e o terceiro canal.

Através das duas tabelas é possível verificar que para o caso do ER de 6 dB a potência do LASER é superior ao caso do ER de 4 dB, isto porque o valor das correntes de polarização e modulação também são superiores. Seria expectável que para um ER de 6 dB, como o

diagrama de olho tem um espaço maior entre os níveis lógicos, que as penalidades de potência relativamente às situações de *back-to-back* e 20 km de fibra ótica, para o valor do BER de $1e-3$ fossem inferiores, contudo isto não acontece o que pode ser justificado pelo aumento dos pulsos óticos enviados de modo a atingir o ER pretendido o que leva a que a oscilação na corrente de polarização e modulação seja maior, chegando perto do valor da corrente de *threshold* aumentando assim a distorção, uma vez que o *chirp* induzido é maior, deteriorando o sistema. Contudo, é ainda possível verificar que para o caso da análise em *back-to-back* o aumento do ER leva a uma redução na potência necessária para obter o mesmo BER, verificando-se assim que o aumento da penalidade de potência com o ER é relativo à análise com fibra ótica.

Comparando os resultados experimentais com os obtidos através de simulação, relativamente à variação do índice de modulação para obter as curvas entre a potência ótica recebida e o BER, na simulação, para um ER de 6.02 dB a penalidade de potência entre a curva em *back-to-back* e a de 20 km de fibra ótica é de 3.6 dB, bastante próximo do valor obtido experimentalmente para o caso do ER de 6 dB, que é de aproximadamente 3.2 dB. Contudo, experimentalmente o aumento do ER leva a um acréscimo de penalidade de potência entre as curvas de *back-to-back* e 20 km de fibra ótica, isto, causado pelas não-linearidades da fibra ótica e pelas interferências resultantes do aproximar das correntes de polarização e modulação do *threshold*. No entanto, através de simulação esta tendência é inversa, uma vez que apenas é introduzido o valor da potência de saída, não existindo os problemas de *threshold*, havendo apenas o valor do *chirp* introduzido, porém, este valor é cada vez mais preponderantes com o aumento da distância de propagação na fibra ótica.

4.2 BOSA Laser modulado diretamente 10 Gb/s NRZ

Em seguida, analisou-se a parte da transmissão de um BOSA, onde dentro deste encontra-se um LASER modulado diretamente, muito semelhante ao analisado na secção anterior. Serão analisados três valores de ER, 4 dB, 5 dB e 5.5 dB.

Esta análise tem o intuito de verificar o comportamento do LASER para diferentes valores de ER e comparar os resultados obtidos com os valores da secção anterior.

Assim, começou-se por caracterizar o LASER através do seu comportamento em relação à potência de saída do mesmo e à corrente de polarização, sendo que a corrente de modulação foi mantida a 0 mA, onde mais uma vez, os limites superiores e inferiores de corrente de polarização foram 25 mA e 105 mA para não danificar o LASER. Foram ainda usadas duas temperaturas, respetivas ao primeiro e quarto comprimento de onda, de modo a perceber o impacto que a temperatura tem na potência de saída do LASER, obtendo o gráfico da figura 4.9:

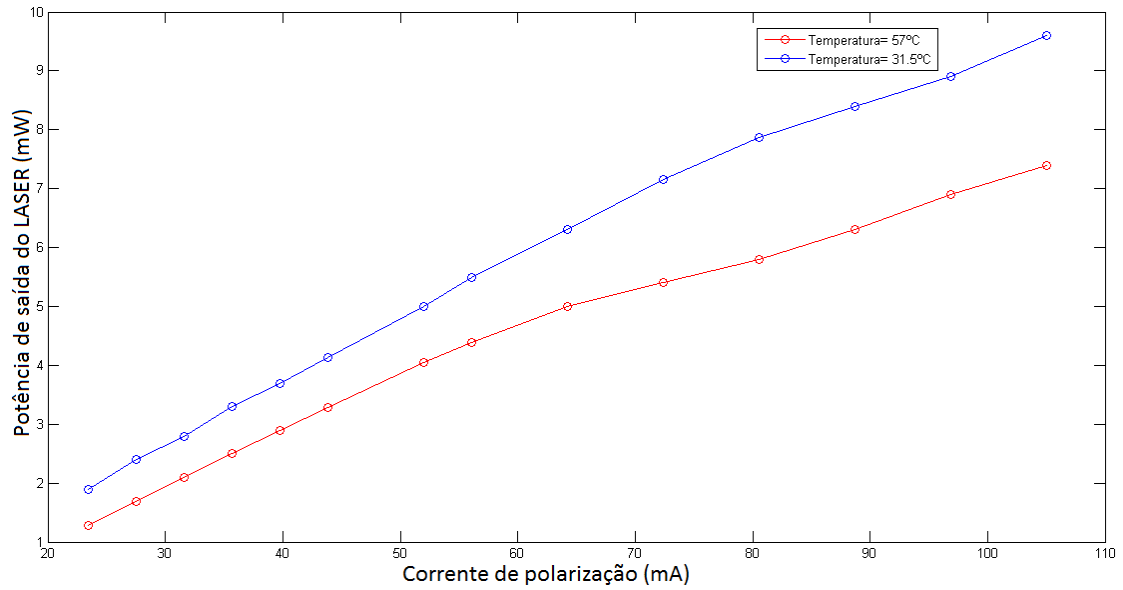


Figura 4.9: Potência de saída do LASER em função da corrente de polarização.

Através da figura anterior é possível verificar a região ativa do LASER, contudo, não é possível verificar os pontos a partir do qual este começa a emitir luz e a saturar. Verifica-se ainda que com o aumento da temperatura a potência de saída do mesmo diminui.

4.2.1 Análise para ER de 4 dB

Começou-se por caracterizar o LASER para um valor de ER de 4 dB, onde os resultados mais relevantes relativamente à caracterização dos quatro comprimentos de onda, são apresentados na tabela 4.5.

Tabela 4.5: Tabela com os dados mais relevantes relativos aos quatro comprimentos de onda

Comprimento de onda (nm)	Temperatura (°C)	Potência laser (dBm)	Ibias (mA)	Imod (mA)
1532.64	31.5	7.74	70.3	73.0
1533.43	40.5	7.95	70.3	70.2
1534.25	45.5	8.66	84.2	83.0
1535.10	55.0	7.99	86.2	81.4

Apenas é apresentado um diagrama de olho uma vez que os quatro diagramas de olho à saída do LASER para os diferentes quatro canais são bastante idênticos, sendo que o diagrama de olho apresentado na figura 4.10 é o referente ao comprimento de onda de 1532.64 nm.

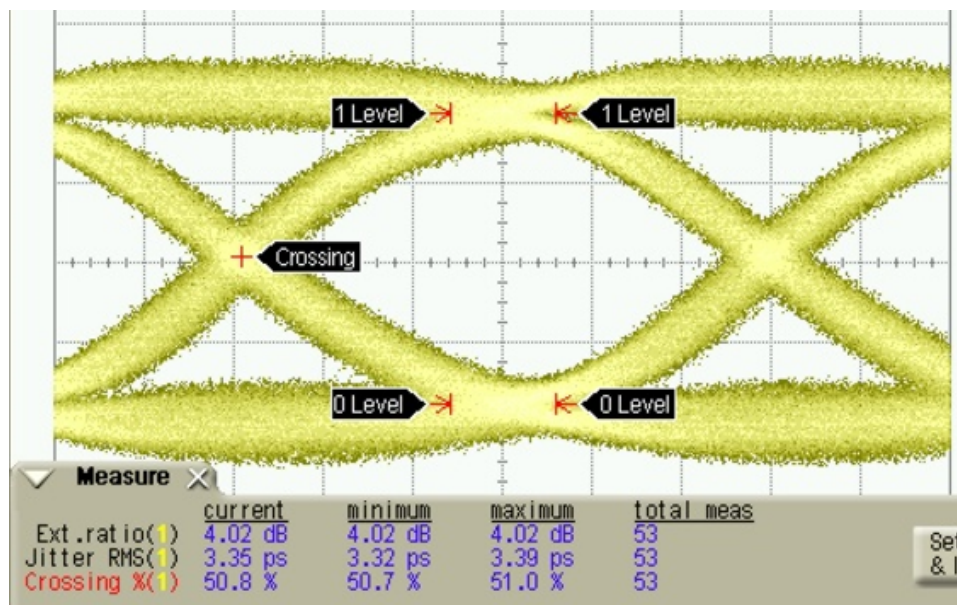


Figura 4.10: Diagrama de olho à saída do LASER.

Em seguida apresenta-se o espectro ótico do sinal, na figura 4.11, referente ao primeiro comprimento de onda, onde é possível verificar o impacto que o *chirp* tem no mesmo:

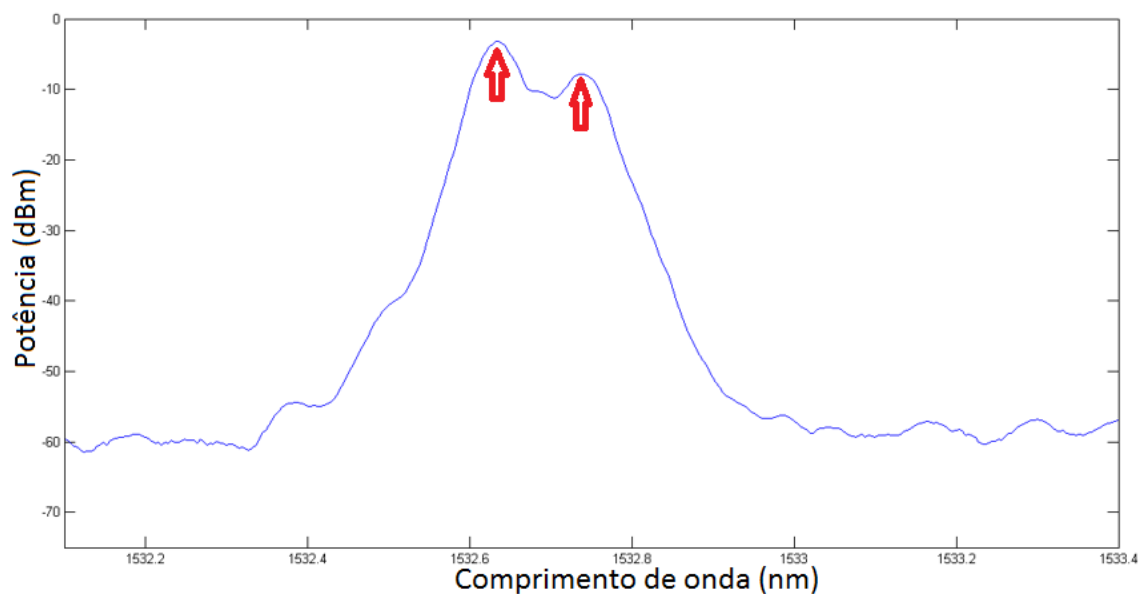


Figura 4.11: Espectro ótico do LASER para o ER de 4 dB respetivo ao comprimento de onda de 1532.64 nm.

Mais uma vez, apresenta-se na tabela 4.6 as diferenças entre os dois maiores picos em potência e comprimento de onda de modo a perceber não só o impacto que os diferentes comprimentos de onda têm, como também para posteriormente ser feita uma análise entre os

dois LASERs analisados.

Tabela 4.6: Tabela com diferenças entre os dois maiores picos dos espectros

Canal	Potência (dB)	Comprimento de onda (nm)
1	4.60	0.108
2	4.85	0.110
3	4.81	0.128
4	4.85	0.140

Em seguida, analisou-se as curvas de BER e potência ótica recebida (figura 4.12) verificando que as curvas encontram-se praticamente sobrepostas, existindo apenas ligeiras alterações que podem estar relacionados com o aumento das correntes de polarização e modulação.

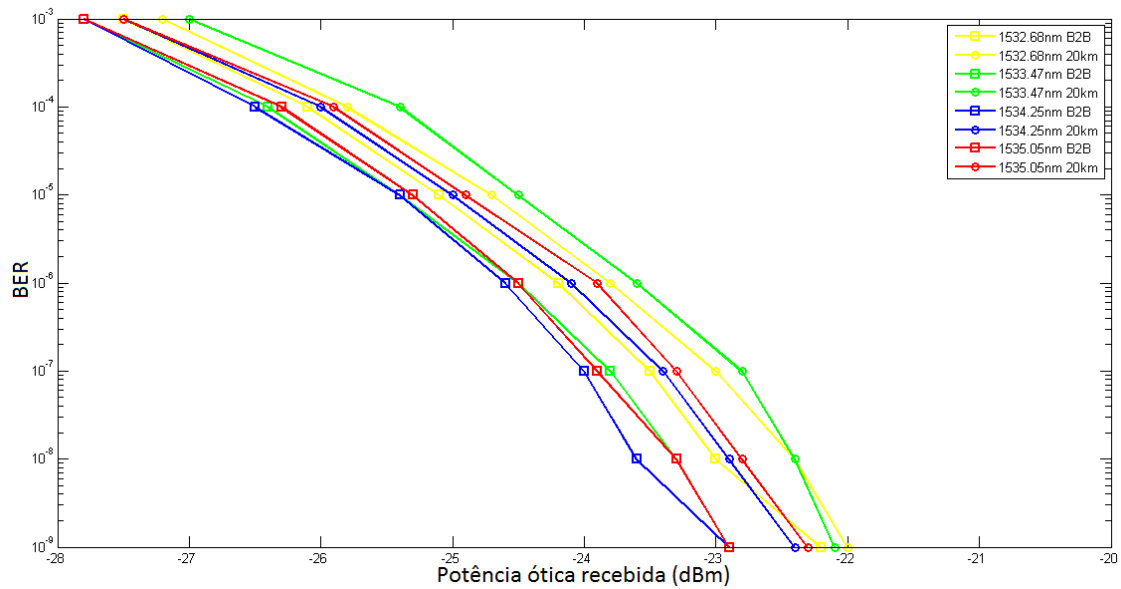


Figura 4.12: Análise entre a potência ótica recebida e o BER para ER de 4 dB.

Através da figura anterior é possível verificar que a penalidade de potência entre os casos de *back-to-back* e com 20 km de fibra é bastante reduzida, obtendo 0.3 dB para o primeiro, terceiro e quarto comprimento de onda e 0.8 dB para o segundo comprimento de onda para um BER de $1e-3$.

Por fim, introduziu-se um APD à saída do *setup*, de modo a verificar o diagrama de olho e perceber o impacto que a fibra ótica tem no sistema. Na figura 4.13 apresentam-se os diagramas de olho à saída do sistema para um BER de $1e-9$ para o caso de *back-to-back* e com 20 km de fibra.

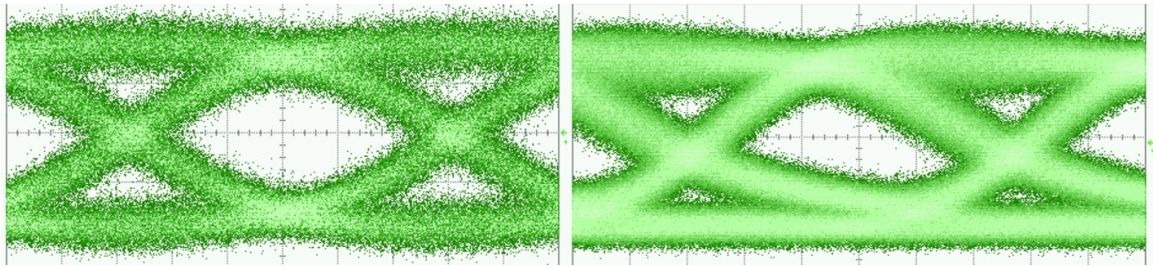


Figura 4.13: Diagrama de olho de saída para um BER de $1e-9$ em *back-to-back* (esquerda) e com 20 km de fibra (direita).

Através da figura anterior é perceptível a degradação do sinal óptico quando é introduzida fibra ótica sendo que ambos os diagramas de olhos foram retirados para um BER de $1e-9$ e distam 0.2 dB de potência.

4.2.2 Análise para ER de 5 dB

Em seguida, procedeu-se à mesma caracterização, mas agora para um valor de ER de 5 dB, onde os resultados mais relevantes relativos aos quatro comprimentos de onda são apresentados na tabela 4.7:

Tabela 4.7: Tabela com os resultados mais relevantes relativos aos quatro comprimentos de onda

Comprimento de onda (nm)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Potência laser (dBm)	Ibias (mA)	Imod (mA)
1532.69	31.5	8.13	70.3	89.8
1533.46	40.5	8.99	70.3	86.2
1534.29	48.0	8.29	77.3	93.2
1535.03	56.5	7.45	77.3	87.8

Mais uma vez, apenas é apresentado um diagrama de olho, sendo o da figura 4.14 o referente ao comprimento de onda de 1532.64 nm.



Figura 4.14: Diagrama de olho à saída do LASER.

Em seguida, apresenta-se o espectro ótico do sinal referente ao primeiro comprimento de onda:

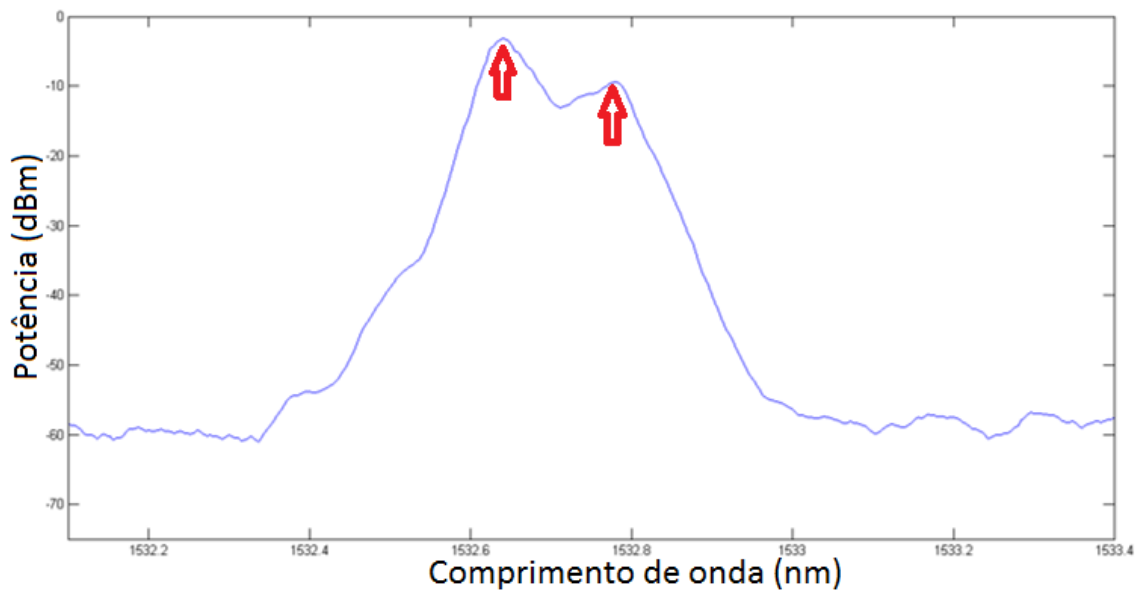


Figura 4.15: Espectro ótico do LASER para o ER de 5 dB respetivo ao comprimento de onda de 1532.69 nm.

Na tabela 4.8 apresentam-se as diferenças entre os dois maiores picos em potência e respetivos comprimento de onda, de modo a perceber não só as diferenças entre comprimentos de onda, como mais tarde, ser analisadas as diferenças para os diferentes ER.

Tabela 4.8: Tabela com diferenças entre os dois maiores picos dos espectros

Canal	Potência (dB)	Comprimento de onda (nm)
1	6.26	0.140
2	6.14	0.136
3	6.77	0.152
4	6.48	0.149

Posteriormente, analisou-se as curvas BER e potência ótica recebida (figura 4.16) verificando que as curvas encontram-se praticamente sobrepostas, existindo apenas ligeiras alterações, principalmente para potências mais elevadas. É ainda possível observar que as penalidades de potências relativamente à análise em *back-to-back* e com 20 km de fibra continuam reduzidas, sendo 1 dB para o primeiro comprimento de onda, 1.4 dB para o segundo comprimento de onda e 1.2 dB para o terceiro e quarto comprimentos de onda para um BER de $1e-3$.

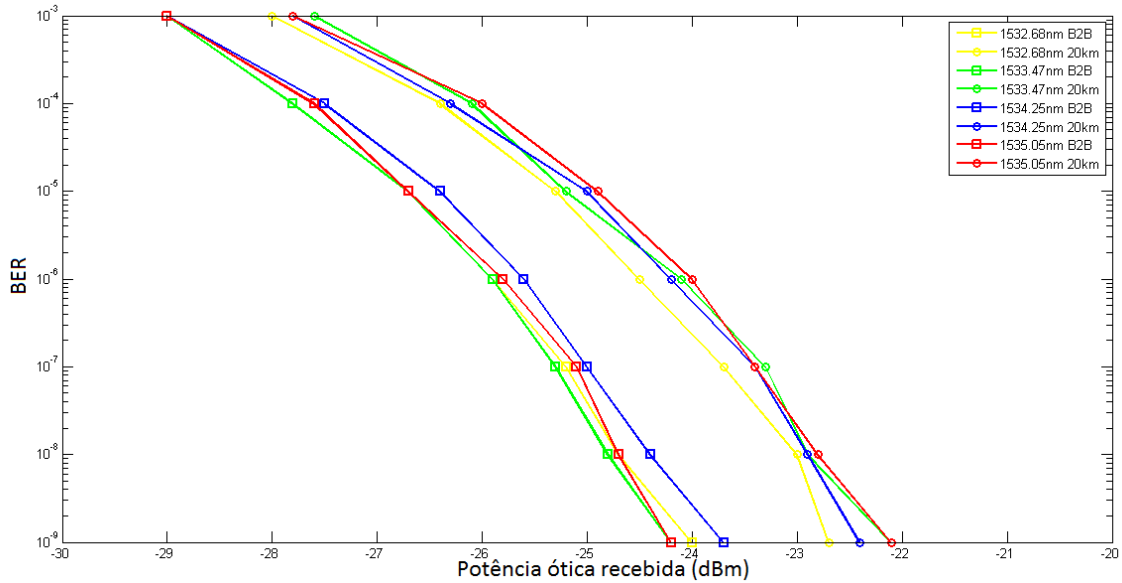


Figura 4.16: Análise entre a potência ótica recebida e o BER para ER de 5 dB.

Por fim, introduziu-se um APD à saída do *setup* de modo a verificar o diagrama de olho e perceber o impacto que a fibra ótica tem no sistema. A figura 4.17 apresenta os diagramas de olho de saída em *back-to-back* e com 20 km de fibra para um BER de $1e-9$, sendo que a potência no caso com 20 km de fibra é superior em 1.3 dB.

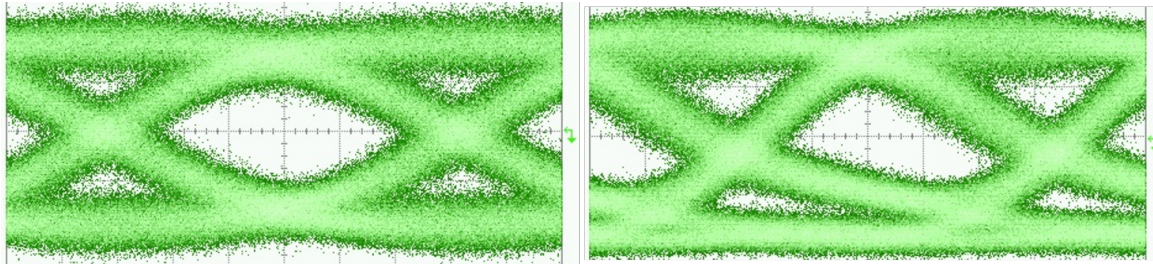


Figura 4.17: Diagrama de olho de saída para um BER de $1e-9$ em *back-to-back* (esquerda) e com 20 km de fibra (direita).

4.2.3 Análise para ER de 5.5 dB

Seguidamente, realizou-se a mesma análise para um ER de 5.5 dB, sendo este o maior valor possível obter tendo como objetivo um diagrama de olho com boas características. Na tabela 4.9 apresentam-se os dados mais relevantes, relativamente à caracterização dos quatro comprimentos de onda.

Tabela 4.9: Tabela com os resultados mais relevantes relativos aos quatro comprimentos de onda

Comprimento de onda (nm)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Potência laser (dBm)	Ibias (mA)	Imod (mA)
1532.68	31.5	8.34	70.3	97.8
1533.48	40.5	7.85	70.3	93.4
1534.24	47.5	8.30	76.4	100.2
1535.04	56.5	7.50	77.3	94.2

A figura 4.18 mostra o diagrama de olho à saída do LASER, referente ao comprimento de onda 1532.68nm.

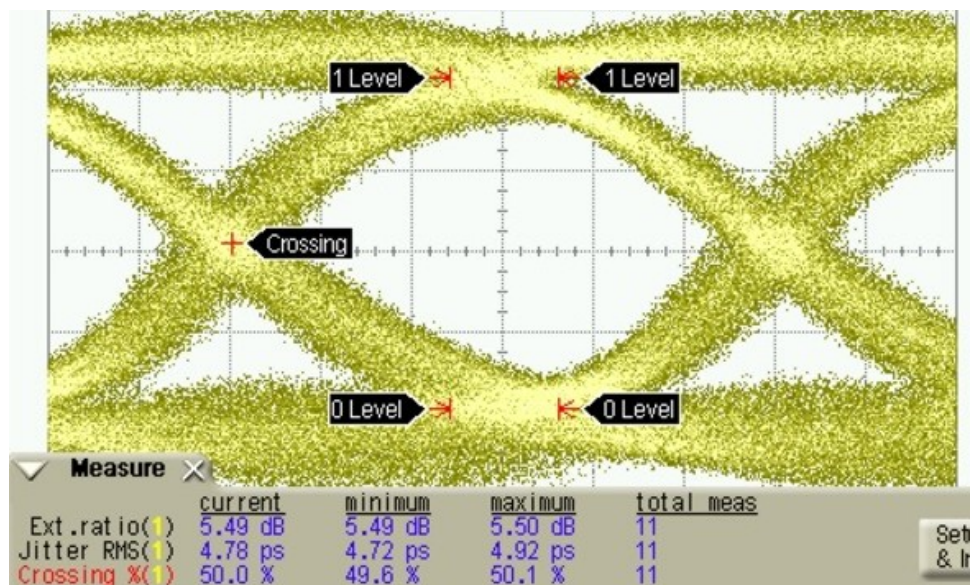


Figura 4.18: Diagrama de olho à saída do LASER.

Em seguida, apresenta-se o espectro ótico do sinal (figura 4.19) referente ao primeiro comprimento de onda:

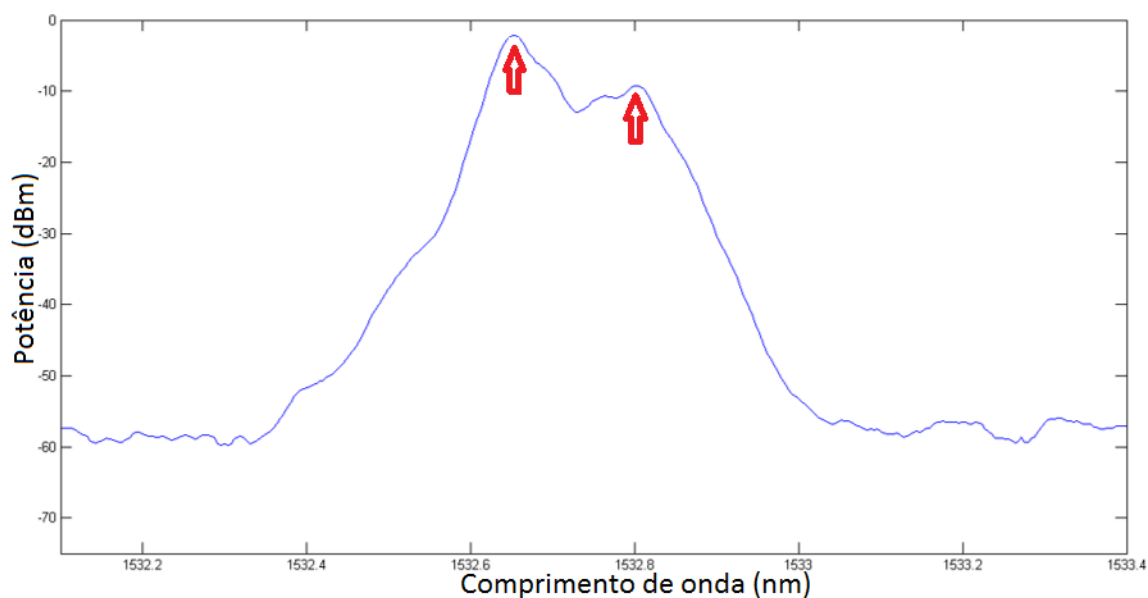


Figura 4.19: Espectro ótico do LASER para o ER de 5.5 dB respectivo ao comprimento de onda de 1532.68 nm.

A tabela 4.10 apresenta as diferenças entre os dois maiores picos em potência e respectivos comprimentos de onda:

Tabela 4.10: Tabela com diferenças entre os dois maiores picos dos espectros

Canal	Potência (dB)	Comprimento de onda (nm)
1	7.19	0.148
2	7.14	0.152
3	7.31	0.160
4	7.28	0.160

Mais uma vez, analisou-se as curvas BER e potência ótica recebida (figura 4.20) onde é possível verificar que as curvas encontram-se praticamente sobrepostas. Contudo as penalidades de potência entre *back-to-back* e com 20 km de fibra aumentaram sendo de 1.5 dB para o primeiro e terceiro comprimentos de onda e 1.9 dB para o segundo e quarto comprimentos de onda.

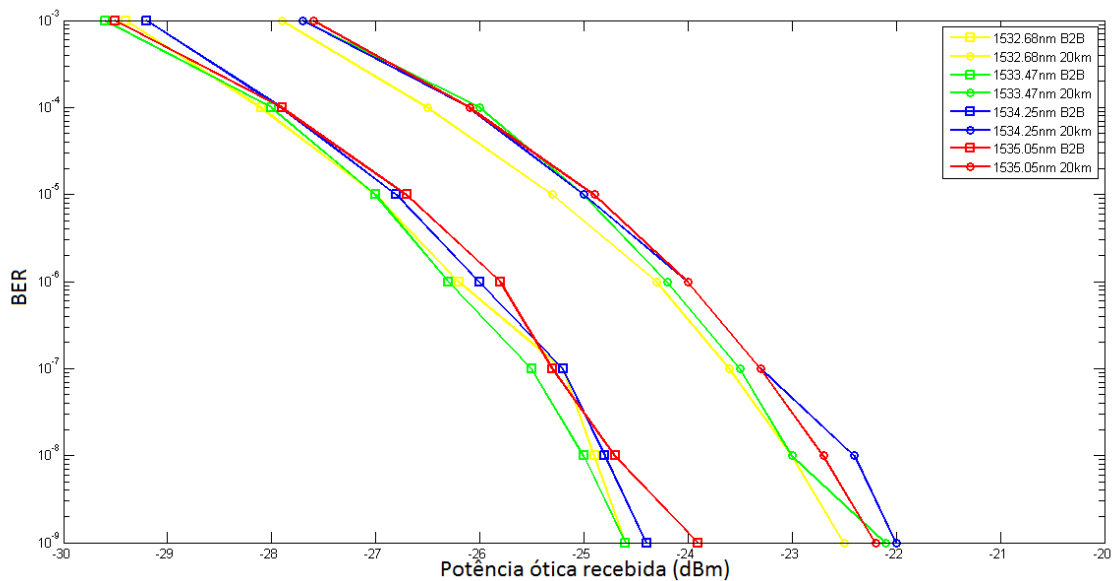


Figura 4.20: Análise entre a potência ótica recebida e o BER para ER de 5.5 dB.

Por fim, introduziu-se um APD à saída do *setup* de modo a verificar o diagrama de olho e perceber o impacto que a fibra ótica tem no sistema. Assim na figura 4.21 apresentam-se os diagramas de olho de saída em *back-to-back* e com 20 km de fibra para um BER de $1e-9$, sendo que a potência para o caso com 20 km de fibra é superior em 2.1 dB.

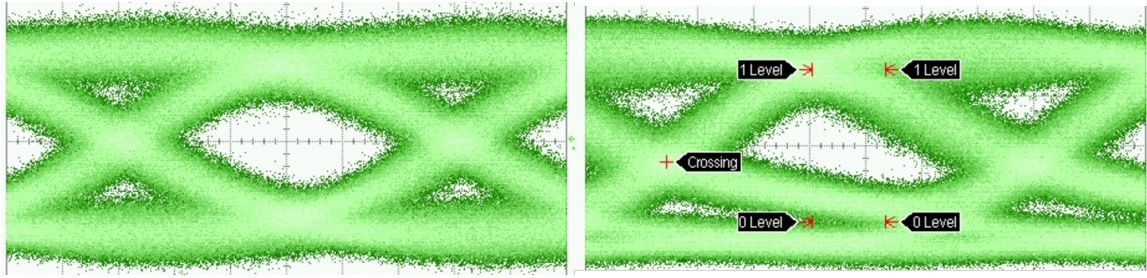


Figura 4.21: Diagrama de olho de saída para um BER de $1e-9$ em *back-to-back* (esquerda) e com 20 km de fibra (direita).

4.2.4 Conclusões BOSA LASER modulado diretamente 10 Gb/s NRZ

Após todos os resultados para o BOSA é fundamental analisá-los para perceber o seu comportamento para diferentes valores de ER. De modo a sintetizar apresentam-se três tabelas com os valores mais importantes das análises efetuadas:

Tabela 4.11: Tabela com os valores obtidos para um ER de 4 dB

Canal	Corrente de Polarização (mA)	Corrente de Modulação (mA)	Potência do LASER (dBm)	Back-to-back (dBm)	20 km (dBm)	Penalidade (dB)
1	70.3	73.0	7.74	-27.5	-27.2	0.3
2	70.3	70.2	7.95	-27.8	-27.0	0.8
3	84.2	83.0	8.66	-27.8	-27.5	0.3
4	86.2	81.4	7.99	-27.8	-27.5	0.3

Através da tabela 4.11 é possível observar que para manter o valor do ER estável, foi necessário aumentar o valor da corrente de polarização, à exceção do segundo comprimento de onda em que o valor é igual ao do primeiro comprimento de onda, contudo, nesse mesmo comprimento de onda, é onde a penalidade de potência entre o sistema em *back-to-back* e com 20 km de fibra é superior. Relativamente à penalidade de potência, entre o sistema em *back-to-back* e com 20 km de fibra ótica, a mesma é bastante reduzida, da ordem dos 0.3 dB, sendo apenas superior para o segundo comprimento de onda, alcançando 0.8 dB.

Seguidamente, analisou-se a mesmo sistema para um ER de 5 dB onde os valores mais importantes estão sintetizados na tabela 4.12:

Tabela 4.12: Tabela com os valores obtidos para um ER de 5 dB

Canal	Corrente de Polarização (mA)	Corrente de Modulação (mA)	Potência do LASER (dBm)	Back-to-back (dBm)	20 km (dBm)	Penalidade (dB)
1	70.3	89.8	8.13	-29.0	-28.0	1.0
2	70.3	86.2	8.99	-29.0	-27.6	1.4
3	77.3	93.2	8.29	-29.0	-27.8	1.2
4	77.3	87.8	7.99	-29.0	-27.8	1.2

Através da tabela anterior é possível observar que foram usados dois valores de corrente de polarização para obter o ER desejado, sendo possível analisar que para todos os quatro comprimentos de onda na análise em *back-to-back* o valor da potência é de -29.0 dBm para um BER de 1e-3, sendo que, as diferentes penalidades acontecem devido às diferentes potências para o caso dos 20 km de fibra. Nesta situação a penalidade de potência já é um pouco superior à anterior, rondando os 1.2 dB.

Por fim, analisou-se a mesmo sistema para um ER de 5.5 dB onde os valores mais importantes estão sintetizados na tabela 4.13:

Tabela 4.13: Tabela com os valores obtidos para um ER de 5.5 dB

Canal	Corrente de Polarização (mA)	Corrente de Modulação (mA)	Potência do LASER (dBm)	Back-to-back (dBm)	20 km (dBm)	Penalidade (dB)
1	70.3	97.8	8.34	-29.4	-27.9	1.5
2	70.3	93.4	7.85	-29.6	-27.7	1.9
3	76.4	100.2	8.30	-29.2	-27.7	1.5
4	77.3	94.2	7.50	-29.5	-27.6	1.9

Neste caso é possível observar que os valores de polarização são bastante parecidos à análise efetuada para o ER de 5 dB, contudo a corrente de modulação é superior, o que permitiu alcançar o ER desejado. Porém, é também possível verificar que as penalidades são também superiores, estando compreendidas entre 1.5 e 1.9 dB.

Através das tabelas 4.6 4.8 4.10 é possível verificar a influência que o ER têm no parâmetro de *chirp*. Sendo que com o aumento do ER a diferença entre os dois maiores picos consecutivos, em comprimento de onda, é cada vez maior, causado pelo fenómeno de *chirp*.

Em suma, assim como se verificou com as conclusões do primeiro LASER analisado, o aumento do ER não levou a uma diminuição da penalidade de potência, o que seria de esperar teoricamente, uma vez, que aumentando o ER, a diferença entre níveis lógicos será maior, levando a uma melhor relação sinal-ruído e consequentemente a uma menor penalidade de potência entre os dois casos analisados. Contudo, experimentalmente essa situação não se verifica, uma vez que o aumento do ER leva a valores de penalidades de potência superiores, isto porque com o aumento dos valores das correntes de polarização e modulação aumenta a oscilação da luz de saída do LASER ficando mais próxima dos valores de *threshold*, aumentando a distorção e consequentemente a penalidade de potência.

4.3 *Chirp Reduced Laser* 10 Gb/s NRZ

Em seguida, analisou-se um CRL, este é em tudo parecido aos DMLs apresentados nas secções anteriores, contudo, tem um filtro após o LASER capaz de reduzir o *chirp*. Pela sua capacidade de atingir um ER de 8.2 dB, este tem como objetivo ser implementado na OLT do sistema. Sendo que, o principal objetivo desta caracterização prende-se na otimização para um ER de 8.2 dB. Para tal, foi utilizado o mesmo *setup* usado na caracterização do LASER DML da figura 4.1.

Começou-se por caracterizar o CRL através do seu comportamento em relação à potência de saída e à corrente de polarização do LASER, para tal, a corrente de modulação foi mantida a 0 mA, obtendo o gráfico da figura 4.22:

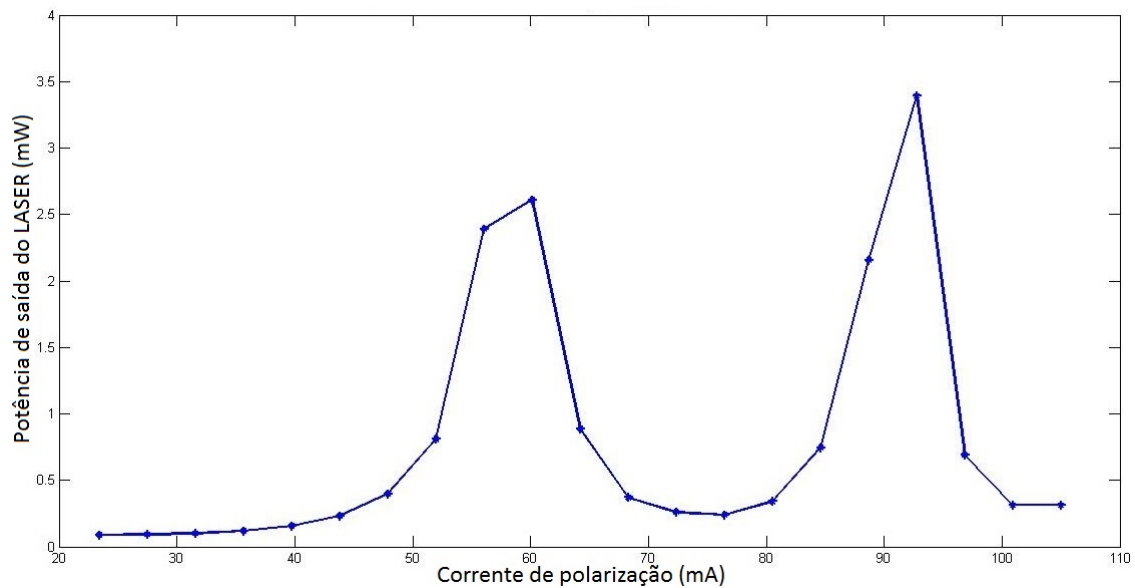


Figura 4.22: Potência de saída do LASER em função da corrente de polarização.

Através da figura 4.22, é possível verificar que o LASER é bastante sensível a variações de corrente de polarização. Contudo, para a caracterização do LASER, o valor máximo de corrente de polarização utilizado foi de 60 mA, verificando-se que para valores superiores ao mesmo, o funcionamento torna-se difícil pela grande oscilação no valor de potência de saída. Este LASER, apesar de usar o TEC, não é sintonizável, contudo, é bastante sensível à temperatura, pelo que o TEC é usado para fixar a temperatura em aproximadamente 43°C, de modo a obter o melhor funcionamento do mesmo. Assim, apenas foi caracterizado um comprimento de onda.

Tabela 4.14: Tabela com os valores obtidos para a caracterização do CRL

Temperatura (°C)	42.75
Comprimento de onda (nm)	1597.95
Potência laser (dBm)	3.20
Potência recetor PIN (dBm)	-1.93
Ibias (mA)	60.1
Imod (mA)	49.4

Em seguida, foi analisado o diagrama de olho do sistema, obtendo o resultado da figura 4.23:

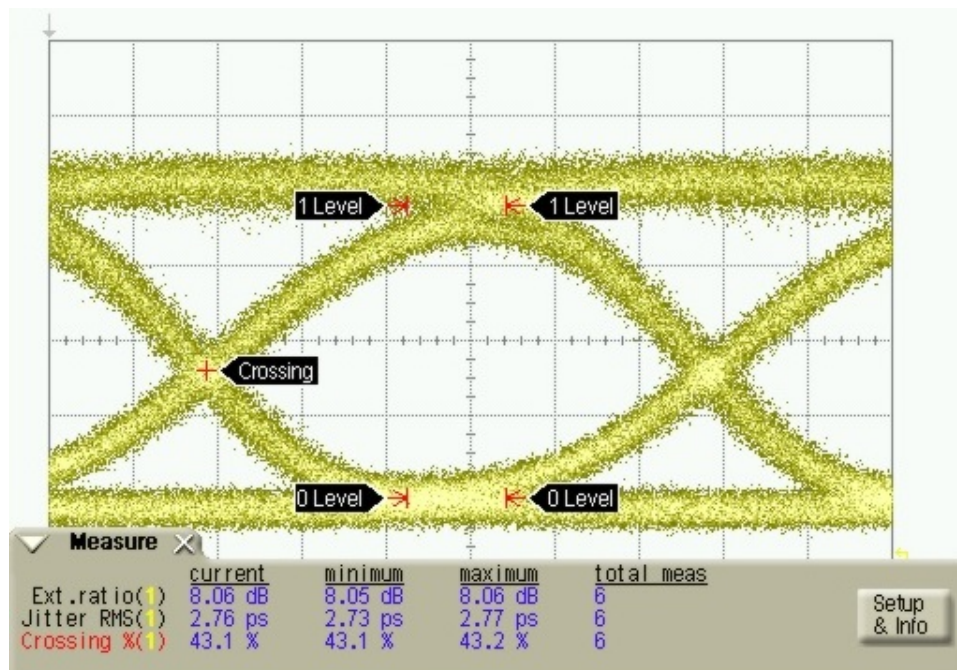


Figura 4.23: Diagrama de olho à saída do LASER.

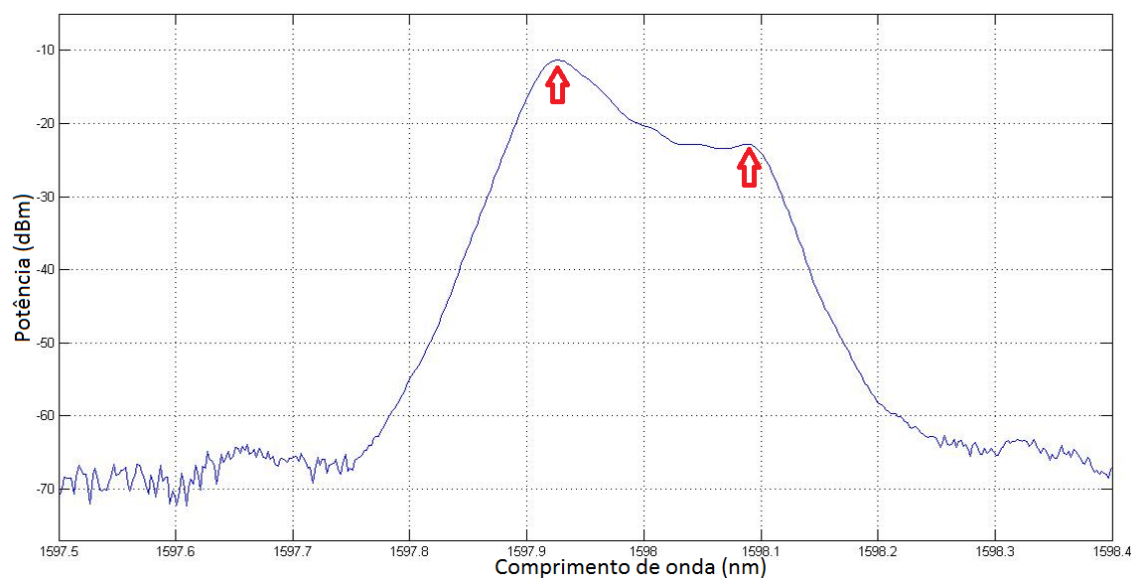


Figura 4.24: Espectro ótico do LASER para o ER de 8.06 dB respectivo ao comprimento de onda de 1597.95 nm.

Neste caso, foi possível verificar que a diferença entre os dois picos do espectro ótico é de 11.55 dB e de 0.164 nm no comprimento de onda.

Por fim, foi feito o teste de sensibilidade do sistema, obtendo os resultados da figura 4.25.

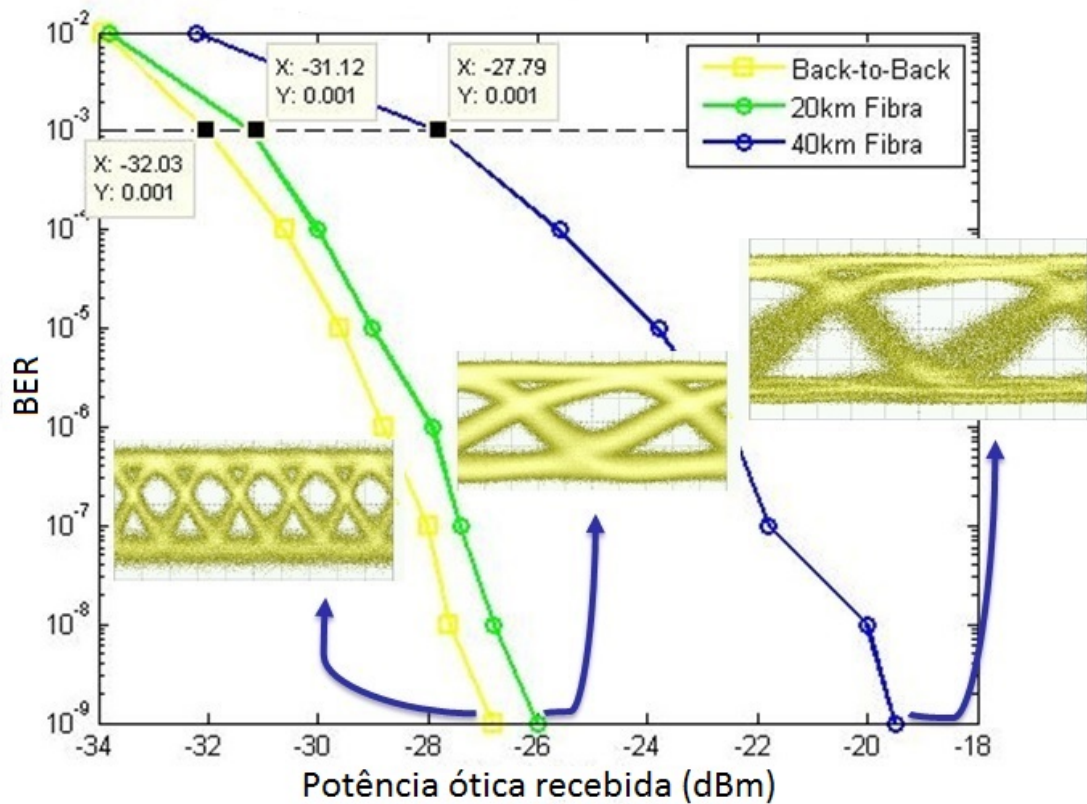


Figura 4.25: Análise entre a potência ótica recebida e o BER para ER de 8.06 dB.

Através da análise do gráfico 4.25 é possível observar que a penalidade para o caso do *back-to-back* e utilizando 20 km de fibra ótica é bastante reduzida, 0.91 dB. Contudo, para o caso dos 40 km de fibra ótica o sistema já apresenta uma penalidade bastante superior de 4.24 dB, no entanto, aquando da medição dos valores observou-se que o BER apresentava bastantes flutuações, não podendo ter o rigor desejado nos resultados, sendo também possível verificar, através dos diagramas de olho, que com a introdução dos 40 km de fibra ótica o mesmo encontra-se bastante degradado.

Apesar dos resultados obtidos serem satisfatórios, tentou-se otimizar o ER de modo a alcançar 8.2 dB, obtendo os seguintes resultados:

Tabela 4.15: Tabela com os valores obtidos para a caracterização do CRL

Temperatura (°C)	43
Comprimento de onda (nm)	1598.058
Potência laser (dBm)	1.10
Potência recetor PIN (dBm)	-3.44
Ibias (mA)	58.1
Imod (mA)	54

Em seguida, foi analisado o diagrama de olho do sistema, obtendo o resultado da figura 4.26:

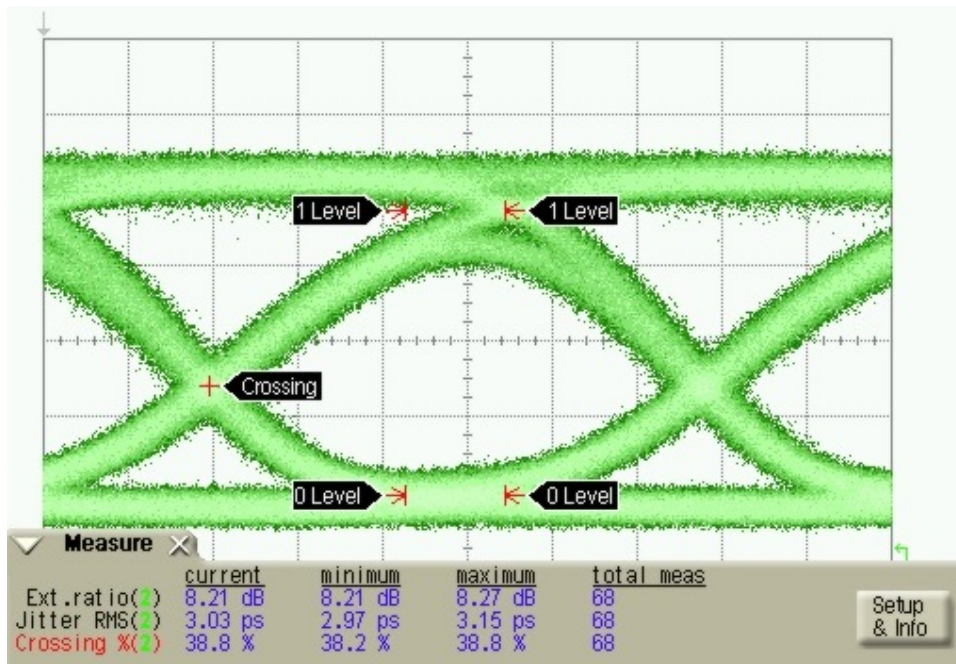


Figura 4.26: Diagrama de olho à saída do LASER.

Por fim, foi feito o teste de sensibilidade do sistema, obtendo os resultados da figura 4.27.

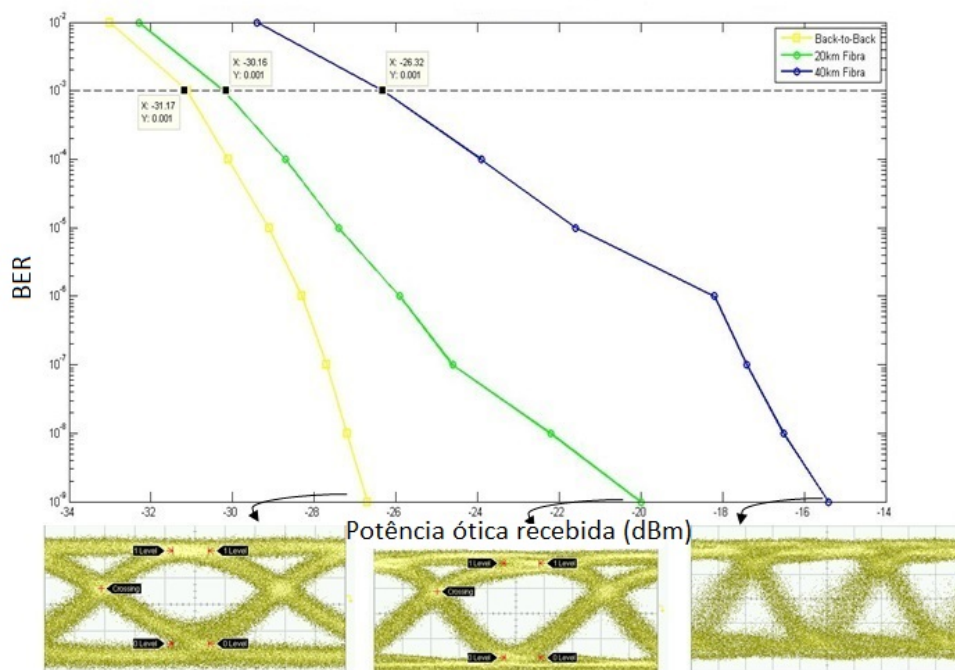


Figura 4.27: Análise entre a potência ótica recebida e o BER para ER de 8.2 dB.

Pela figura 4.26 é possível verificar que o ER é de 8.21 dB, contudo o diagrama de olho apresenta alguns problemas, uma vez que o ponto de cruzamento não se encontra nos 50 %,

e a parte superior do diagrama de olho está um pouco abaixo da linha do nível lógico '1' aumentando a distorção.

Através da análise do gráfico 4.27 é possível observar que a penalidade para o caso do *back-to-back* e utilizando 20 km de fibra ótica é bastante reduzida, 1.01 dB. Contudo, para o caso dos 40 km de fibra ótica o sistema já apresenta uma penalidade bastante superior de 4.85 dB, no entanto, aquando da medição dos valores observou-se que o BER apresentava bastantes flutuações, não podendo ter o rigor desejado nos resultados, sendo também possível verificar, através dos diagramas de olho, que com a introdução dos 40 km de fibra ótica o mesmo encontra-se bastante degradado.

4.3.1 Conclusões CRL

Assim como foi feito para o LASER DML, apresentam-se as conclusões mais importantes da análise feita para o CRL.

Tabela 4.16: Tabela com valores obtidos para CRL

Canal	Corrente de Polarização (mA)	Corrente de Modulação (mA)	Potência do laser (dBm)	Back-to-Back (dBm)	20 km (dBm)	40 km (dBm)	Penalidade B2B-20km & B2B-40km (dB)
1	60.1	49.4	3.2	-32	-31.1	-27.8	0.9 & 4.2
Optimização	58.1	54	1.1	-31.2	-30.2	-26.3	1 & 4.9

Como é possível ver pela tabela 4.16, ajustando os valores das correntes de polarização e modulação foi possível baixar a potência do LASER em 1.1 dBm e manter praticamente as mesmas penalidades para os três casos analisados, verificando que a otimização teve sucesso não só a nível do *extinction ratio* mas também em todos os outros parâmetros do sistema.

Através destas conclusões é agora possível comparar os resultados obtidos através da simulação e experimentalmente. Assim, através da simulação e para um ER de 8.24 dB, foi necessário utilizar uma potência de pico do LASER de 10 mW, existindo uma penalidade de potência entre a simulação em *back-to-back* e com 20 km de fibra de 0.9 dB. Experimentalmente, para um ER de 8.2 dB obteve-se uma penalidade de 1 dB para a mesma análise.

Estes valores são bastante aproximados, tendo em conta que o LASER usado experimentalmente não elimina completamente o *chirp* existente, tendo ainda a seu favor o facto de precisar de uma potência de lançamento inferior para obter o mesmo ER e penalidade de potência semelhante.

4.4 Comparação entre LASERs

Como é possível verificar pelas análises feitas anteriormente aos três LASERs e apesar de terem propósitos diferentes, uma vez que, os dois primeiros LASERs, DMLs, tem como objetivo a transmissão a partir da ONU e o CRL a transmissão a partir da OLT, é possível verificar algumas características de ambos de modo a compará-los.

Relativamente aos dois LASERs DML, a motivação que levou à caracterização de dois transmissores do mesmo tipo, prende-se no facto de perceber as características de ambos que melhoram ou pioram o desempenho do sistema.

Começou-se por verificar a largura de linha dos dois LASERs, sem correntes de polarização e modulação, obtendo resultados muito semelhantes, de aproximadamente 0.031 nm, equivalente a 3.9 GHz.

Em seguida, verificou-se as curvas características, potência de saída em função da corrente de polarização de ambos os LASERs, sendo que a corrente de modulação deveria ser o menor possível, contudo aqui os resultados podem induzir a algum erro, uma vez que, no primeiro transmissor analisado, a corrente de modulação foi de 83 mA e no segundo foi de 0 mA, no entanto verificou-se que a corrente de modulação tem um impacto bastante reduzido na potência de saída do LASER. Esta discordância nos valores da corrente de modulação dos dois LASERs aconteceu, uma vez que, após a análise do primeiro transmissor, em que se utilizou corrente de modulação para a análise da curva característica do mesmo, este foi retirado da placa de teste MAX3949, sendo soldado o próximo LASER para análise, não tendo mais hipótese de retificar o problema. Assim, através das suas curvas características, é possível analisar que o declive da região ativa do primeiro LASER é superior ao segundo, sendo então interessante analisar o desempenho dos mesmos, de modo a determinar o impacto que diferentes declives da região ativa das curvas características dos LASERs têm no sistema.

Seguidamente, analisou-se o desempenho do sistema para diferentes valores de ER, sendo que no primeiro caso os valores foram de 4 e 6 dB e no segundo foram de 4, 5 e 5.5 dB. Através das conclusões dos dois transmissores feitas no final de cada análise, é possível verificar que no primeiro estudo os valores das correntes de polarização e modulação são bastante inferiores aos usados para o segundo caso, contudo a potência à saída do LASER é superior no primeiro caso, explicando os resultados obtidos para as curvas características dos LASERs. Relativamente aos valores obtidos para a sistema em *back-to-back* é possível verificar que os resultados são próximos, sendo inferiores no caso do primeiro LASER. Contudo com a introdução dos 20 km de fibra o segundo transmissor tem uma penalidade de potência muito inferior ao primeiro, sendo justificável pelos diferentes pontos de funcionamento utilizados para alcançar o mesmo *extinction ratio*, uma vez que, no primeiro caso, são usados valores de correntes de polarização e modulação bastante inferiores, obrigando o LASER a funcionar mais perto do valor da corrente de *threshold*, aumentando o ruído total do sistema.

Por fim, analisou-se o LASER CRL, este tem uma largura de linha de 0.029 nm, aproximadamente 3.6 GHz, é capaz de efetuar transmissões até 40 km, o que não foi possível com os LASERs DML e apresenta uma penalidade bastante reduzida para o caso do *back-to-back* e dos 20 km de fibra, tendo em conta o ER. Tendo todas as vantagens apresentadas anteriormente o CRL tem ainda uma potência de lançamento inferior em comparação com a dos DMLs, o que é um fator bastante importante a ter em conta quando se pretende implementar uma rede ótica.

Capítulo 5

Conclusões e trabalho futuro

5.1 Conclusões

Esta dissertação teve como objetivo o estudo e análise da tecnologia NG-PON2, mais propriamente de transmissores diretamente modulados, no contexto da mesma. É fundamental o estudo destes transmissores, uma vez que, a tecnologia NG-PON2 caracteriza-se pelo aumento da capacidade da taxa de dados por cliente, pela coexistência com outras tecnologias anteriores e principalmente pela diminuição de custos, tanto a nível do cliente como da empresa fornecedora do serviço. Assim, o estudo realizado no âmbito desta dissertação focou-se em analisar a melhor relação entre o ER e a qualidade da transmissão. Deste modo, começou-se pelo estudo da redes óticas de acesso passivas percebendo a sua arquitetura e os componentes principais das redes PON e ainda as normas precedentes ao NG-PON2. Passando de seguida, para a tecnologia em estudo nesta dissertação, NG-PON2, nesta estudou-se a motivação à criação da tecnologia, assim como, a sua arquitetura e características. Em seguida, estudou-se os transdutores existentes no contexto do NG-PON2, percebendo como se comportam enquanto interfaces conectáveis e compactas, analisando os principais componentes de transmissão/receção existentes. Finalizando o capítulo 2, estudou-se os principais componentes óticos existentes numa rede ótica, dando ênfase aos componentes utilizados no trabalho experimental desenvolvido. Este capítulo foi de grande importância uma vez que permitiu desenvolver os conhecimentos tanto da tecnologia em estudo, assim como, de todos os componentes existentes, percebendo as suas vantagens e limitações.

No capítulo 3, desenvolveu-se várias simulações de modo a perceber o impacto que o ER e o *chirp* têm na tecnologia em estudo. Assim, através deste capítulo foi possível verificar que o aumento do índice de modulação, aumenta também o ER, melhorando não só as penalidades entre os casos de *back-to-back* e 20 km de fibra, assim como, problemas de não-linearidades existentes com fibra ótica, para potências mais elevadas. No caso da análise do transmissor com *chirp*, concluiu-se que um índice de modulação elevado é bastante significativo no desempenho do sistema, uma vez que para índices de modulação inferiores a 0.95 o desempenho do sistema começa a degradar-se aumentando a penalidade de potência para os casos em *back-to-back* e com 20 km de fibra ótica.

Seguidamente, no capítulo 4, analisaram-se três LASERs, sendo que dependendo das suas características, mais propriamente do ER que conseguem atingir, têm o intuito de serem implementados em zonas diferentes da arquitetura do NG-PON2. Assim, os dois primeiros têm a finalidade de serem implementados na ONU da arquitetura e o último ser implementado na

OLT. Relativamente aos dois primeiros LASERs, conhecidos como DML, é possível concluir que a curva característica potência em função da corrente de polarização toma um papel fundamental no desempenho dos mesmo, uma vez que, diferentes pontos de funcionamento terão diferentes impactos nos objetivos pretendidos. Isto porque, quanto menor for o ponto de funcionamento, ou seja, quanto mais próximo os valores da corrente de polarização e modulação estiverem da corrente de *threshold* do LASER, mais distorção existirá uma vez que o *chirp* induzido é maior, aumentando a penalidade de potência para as análises feitas em *back-to-back* e com 20 km de fibra. Por fim, analisou-se um LASER diferente dos anteriores, uma vez que, este tem o intuito de reduzir o *chirp*, melhorando o aspeto do espectro ótico. Este tem uma potência de lançamento bastante inferior aos anteriores, alcançando um ER superior e com penalidades de potências bastante reduzidas, contudo, relativamente à redução do parâmetro de *chirp* é possível observar que os valores obtidos para a diferença entre picos nos espectros óticos dos três LASERs modulados diretamente é praticamente a mesma, todavia, como já foi referido o último apresenta as melhores características relativamente a penalidade de potência e ER.

Como foi referido os LASERs modulados diretamente apresentam algumas desvantagens em relação aos modulados externamente, nomeadamente o *chirp* que não permite transmissões a grandes distâncias. Esta característica foi bem visível através dos resultados experimentais, onde os DMLs apenas conseguiram alcançar os 20 km de distância e o CML os 40 km, contudo mesmo no último caso a medição apresentou algumas imprecisões na leitura do BER. Sendo possível corroborar as principais características destes LASERs que apesar de serem simples e baratos são ideais para comunicações a curtas distâncias.

5.2 Trabalho futuro

Como trabalho futuro, sugerem-se os seguintes pontos:

- Analisar o impacto dos fenómenos não lineares da propagação na fibra ótica, para a tecnologia em estudo.
- Analisar, experimentalmente e através de simulação, a interação entre canais para o TWDM-PON.
- Caracterização e análise experimental do parâmetro de *chirp* para diferentes DMLs.
- Análise, em laboratório, de diferentes DMLs com o intuito de reduzir o efeito de *chirp* e melhorar a distância de propagação.
- Análise, em laboratório, da penalidade de potência para diferentes recetores óticos.

Bibliografia

- [1] T. Pfeiffer, “Architectures and technologies for future optical access and metro networks,” in *Photonic Networks, 14. 2013 ITG Symposium. Proceedings*, pp. 1–2, VDE, 2013.
- [2] ZTE, “Insights into next-generation pon evolution.” http://www.zte.com.cn/endata/magazine/zte technologies/2012/no4/articles/201207/t20120712_325632.html. Acedido em: 11/07/2016.
- [3] T. Pfeiffer, “Architectures and technologies for future optical access and metro networks,” in *Photonic Networks, 14. 2013 ITG Symposium. Proceedings*, pp. 1–2, VDE, 2013.
- [4] J. Segarra, V. Sales, V. Polo, and J. Prat, “Dimensioning olt architectures for udwdm-pons employing coherent transceivers,” in *Transparent Optical Networks (ICTON), 2015 17th International Conference on*, pp. 1–6, IEEE, 2015.
- [5] M. Emmendorfer, “Comparing ieee epon & fsan/itu-t gpon family of technologies.” AR-RIS.
- [6] ANACON, “Ftth/b/p networks.” http://www.anacom.pt/render.jsp?categoryId=340669#.V4D_grgrK00. Acedido em: 09/07/2016.
- [7] TELEFOCAL, “Next generation access network - gpon fttx solution and infrastructural development.” <http://www.telefocal.com/resource/industrial-news/658-next-generation-access-network-gpon-ffttx-solution-and-infrastructural-development>. Acedido em: 09/07/2016.
- [8] A. Srivastava, “Next generation pon evolution,” in *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, vol. 8645, p. 09, 2013.
- [9] D. Nessel, “Ng-pon2 technology and standards,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 5, pp. 1136–1143, 2015.
- [10] Y. Luo, X. Zhou, F. Effenberger, X. Yan, G. Peng, Y. Qian, and Y. Ma, “Time- and wavelength-division multiplexed passive optical network (twdm-PON) for next-generation PON stage 2 (ng-PON2),” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 31, pp. 587–593, Feb. 2013.
- [11] T. ITU, “Telecommunication standardization sector of itu,” *Annex C: RTP payload format for H*, vol. 261, pp. 108–113, 1993.
- [12] “Itu-t recommendation g.989.2, 40-gigabit-capable passive optical networks 2 (ng-pon2): Physical media dependent (pmd) layer specification.”

- [13] D.-K. Electronics, “High speed pluggable i/o solutions.” <http://dkc1.digikey.com/ch/fr/TOD/TycoElectronicsAMP/HighSpeedPluggableIO/HighSpeedPluggableIO.html>. Acedido: 12/11/2015.
- [14] T. Networking, “More information about fiber optic transceivers.” <https://fiberopticsof.wordpress.com/category/fiber-optic-transceiver/>. Acedido: 28/05/2016.
- [15] F. Optictel, “3 answers to what is sfp transceiver?.” <http://www.fiberoptictel.com/3-answers-to-what-is-sfp-transceiver/>. Acedido: 05/02/2016.
- [16] F. Optictel, “10g xfp transceiver.” <http://www.fiberoptictel.com/10g-xfp-fiber-optic-transceiver-module/>. Acedido: 07/02/2016.
- [17] D. Kim, J. Shim, Y.-C. Keh, and M. Park, “Design and fabrication of a transmitter optical subassembly (tosa) in 10-gb/s small-form-factor pluggable (xfp) transceiver,” *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 12, pp. 776–782, July 2006.
- [18] C. DeCusatis, *Handbook of fiber optic data communication: a practical guide to optical networking*. Academic Press, 2013.
- [19] eoptolink, “Tosa.” <http://www.eoptolink.com/products/tosa>. Acedido: 24/05/2016.
- [20] eoptolink, “Rosa.” <http://www.eoptolink.com/products/rosa>. Acedido: 24/05/2016.
- [21] C. F. Lam, *Passive optical networks: principles and practice*. Academic Press, 2011.
- [22] C. Peucheret, “Direct and external modulation of light,” *Technical University of Denmark, Denmark*, 2009.
- [23] V. Alwayn, *Optical network design and implementation*. Cisco Press, 2004.
- [24] R. photonics, “Rp photonics encyclopedia.” <https://www.rp-photonics.com/linewidth.html>. Acedido:16/02/201.
- [25] R. Yuen, X. N. Fernando, and S. Krishnan, “Radio over multimode fiber for wireless access,” in *Electrical and Computer Engineering, 2004. Canadian Conference on*, vol. 3, pp. 1715–1718, IEEE, 2004.
- [26] E. Sackinger, *Broadband Circuits for Optical Fiber Communication*. Wiley Interscience, 2005.
- [27] D. Mahgerefteh, Y. Matsui, X. Zheng, and K. McCallion, “Chirp managed laser and applications,” *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 16, no. 5, pp. 1126–1139, 2010.
- [28] K. Grobe and M. Eiselt, *Wavelength Division Multiplexing: A Practical Engineering Guide*. John Wiley & Sons, 2013.
- [29] J. D. Gibson, *The communications handbook*. CRC press, 2002.

- [30] G. P. Agrawal, "Optical fiber communication systems," *New York: A Wiley*, vol. 2, 2003.
- [31] H. Willebrand and B. S. Ghuman, *Free space optics: enabling optical connectivity in today's networks*. SAMS publishing, 2002.
- [32] K. Schneider and H. Zimmermann, *Highly sensitive optical receivers*. Springer, 2006.
- [33] I. Djordjevic, W. Ryan, and B. Vasic, "Channel coding for optical channels," *Coding for Optical Channels*, Jan. 2010.
- [34] P. A. Govind, "Fiber-optic communication systems," *John Wiley, New York*, 2002.
- [35] D. Hood and E. Trojer, *Gigabit-capable passive optical networks*. John Wiley & Sons, 2012.
- [36] F. O. Wiki, "Understand fiber attenuation." <http://www.fowiki.com/b/understand-fiber-attenuation/>, 2015. Acedido: 27/05/2016.
- [37] B. Collings, F. Heismann, and G. Lietaert, "Reference guide to fiber optic testing," *Advanced Fiber Optic Testing. High-Speed Fiber Link and Network Characterization*, vol. 2, 2010.
- [38] Fiber-Optics, "Chromatic dispersion." http://www.fiber-optics.info/fiber_optic_glossary/chromatic_dispersion. Acedido: 18/02/2016.
- [39] C. DeCusatis and I. Kaminow, *The Optical Communications Reference*. Academic Press, 2009.
- [40] "Vpiphotonics gmbh user's manual," 2013.